

TREBALL FI DE GRAU

**Grau en Enginyeria Mecànica**

**DISSENY I FABRICACIÓ DE FONS PLA PER A FORMULA  
STUDENT**



**Memòria i Annexos**

**Autor:** Victor Mercadal Llobera  
**Director:** Alfred Fontanals Garcia  
**Convocatòria:** Octubre 2017



## Resum

Aquest projecte recull totes les etapes per al desenvolupament d'un fons pla per a Formula Student, incloent-hi l'estudi teòric, disseny aerodinàmic, disseny de mètodes d'acoblament, fabricació pròpia i implementació a un model real.

L'objectiu d'aquest document és el de realitzar un estudi exhaustiu del comportament aerodinàmic d'un fons pla mitjançant el desenvolupament de la peça, acoblament a un vehicle de Formula Student real i avaluació dels seus beneficis en carrera. Per altra banda, minimitzar el seu pes també és un dels objectius principals del projecte.

Primerament, es recopila i resumeix informació procedent de les obres més rellevants en la literatura sobre aquest tema, a més de la realització d'assajos propis mitjançant simulacions CFD amb el software StarrCCM+. De la mateixa manera, i fent servir SolidWorks com a programa de CAD, s'ha dissenyat la geometria òptima de la peça, així com el mètode d'acoblament. Finalment, s'ha implementat la simulació de fibres mitjançant Ansys ACP i s'ha fet servir el mètode d'infusió com recurs de fabricació.

El fons pla és l'element aerodinàmic que millor eficiència presenta i té una forta relació amb tots els elements del vehicle. És per això que és necessari tenir present aspectes com la influència de l'aleró davanter, el deixant del vehicle o el gir de les rodes. Aquest projecte és una excel·lent guia per a qualsevol que vulgui iniciar-se en la producció d'elements aerodinàmics com el fons pla i presenta moltes idees per la millora del seu rendiment.

## Resumen

Este proyecto abastece todas las etapas para el desarrollo de un fondo plano para Formula Student, incluyendo el estudio teórico, diseño aerodinámico, diseño de métodos de ensamblaje, fabricación propia e implementación a un modelo real.

El objetivo de este documento es el de realizar un estudio exhaustivo del comportamiento aerodinámico de un fondo plano mediante el desarrollo de la pieza, acoplamiento a un vehículo de Formula Student real y evaluación de sus beneficios en carrera. Por otro lado, minimizar su peso también es uno de los objetivos principales del proyecto.

Primeramente, se recopila y resume información procedente de las obras más relevantes en la literatura sobre este tema, además de la realización de ensayos propios mediante simulaciones CFD con el software StarrCCM+. Del mismo modo, y usando SolidWorks como programa de CAD, se ha diseñado la geometría óptima de la pieza, así como el método de acoplamiento. Finalmente, se ha implementado la simulación de fibras mediante Ansys ACP y se ha usado el método de infusión como recurso de fabricación.

El fondo plano es el elemento aerodinámico que mejor eficiencia presenta y tiene una fuerte relación con todos los elementos del vehículo. Es por eso que es necesario tener presente aspectos como la influencia del alerón delantero, la estela del vehículo o el giro de las ruedas. Este proyecto es una excelente guía para cualquier que quiera iniciarse en la producción de elementos aerodinámicos como el fondo plano y presenta muchas ideas para la mejora de su rendimiento.



## **Abstract**

This project provides all the stages for the development of an undertray for a Formula Student, including theoretical study, aerodynamic design, assembly methods, own manufacture and implementation to a real model.

The aim of this document is to realise an exhaustive study of the aerodynamic behaviour of an undertray by means of the development of the piece, assembly to a real Formula Student vehicle and evaluation of its benefits in track. On the other hand, minimise its weight is also one of the main goals of the project.

Firstly, information from the most relevant sources in the literature on this subject is collected and summarized, in addition to own testing realisation by means of CFD simulations with the software StarrCCM+. In the same way, and using SolidWorks as a program of CAD, it has designed the optimum geometry of the piece, as well as the assembly method. Finally, carbon fiber simulation has been implemented through Ansys ACP and it has been used infusion as a manufacture resource.

The undertray is the most efficient aerodynamic element and it is highly influenced by the rest of the elements of the vehicle. That's why it is necessary to have in account aspects like the influence of the front wing, the wake of the vehicle or the wheel spin. This project is an excellent guide for anyone that want to initiate in the production of aerodynamic elements such as the undertray and presents many ideas to improve its performance.

## Agraïments

Primerament, agrair als meus pares per haver confiat sempre en mi i haver-m'ho donat tot.

Al meu tutor, Alfred Fontanals, per permetre'm realitzar aquest projecte i per ajudar-me i guiar-me sempre que ho he demanat.

A l'equip e-Tech Racing, per donar-me l'oportunitat de formar part d'aquesta gran experiència que és la Formula Student. Sobretot, agrair als meus companys de departament Victor Pérez, Dani Lozano, Christian Gutiérrez i Gerard Mingot, per tota l'ajuda que m'han donat i que han fet possible aquest projecte.

A Tomás Martín i Victor Pérez per servir-me com a exemple a seguir i a més, permetre'm tenir accés als seus respectius treballs de fi de grau.

A totes aquelles empreses que veuen en la Formula Student una inversió de futur i permeten que joves estudiants puguin realitzar els seus somnis. Sobretot, donar les gràcies a CD Adapco, CSUC, Hp, Prototech i Nexus Projectes, que sense l'ajuda dels quals aquest projecte no s'hagués materialitzat.

## Glossari

$p$	Pressió estàtica
$\rho$	Densitat
$v$	Velocitat
$H$	Pressió total
$C_p$	Coeficient de pressió
$C_L$	Coeficient de sustentació
$C_x$	Coeficient de resistència
$Re$	Número de Reynolds
$\mu$	Viscositat
$Q$	Cabal
$Cop$	Centre de pressions

## Llista de taules

Taula 1: Estudi de convergència de malla (Pérez, V., Desarrollo de elementos aerodinámicos del prototipo Formula Student E-tech Racing)	64
Taula 2: Resultats simulació base.	65
Taula 3: Comparativa simulació base/ amb difusor.	66
Taula 4: Comparativa configuració d'aletes.	72
Taula 5: Costos d'enginyeria.	103
Taula 6: Costos de fabricació.	103
Taula 7: Cost total.	104
Taula 8: Convergència de malla.	108
Taula 9: Influència de l'altura.	108
Taula 10: Dimensionament d'angle.	109
Taula 11: Dimensionament de longitud.	109
Taula 12: Dimensionament de curvatura.	110
Taula 13: Resultats simulació 3D.	111

## Llista de figures

Figura 1: Zona de marge segons la definició de vehicle tipus Formula (FSG Rules 2017).	18
Figura 2: Dimensions màximes i posicionament del elements aerodinàmics (FSG Rules 2017).	19
Figura 3: Mesura de pressió estàtica (Race car vehicle Dynamics).	22
Figura 4: Interferència de superfície plana amb un flux d'aire (Race car vehicle Dynamics).	23
Figura 5: Flux d'aire a través d'un perfil alar (Race car vehicle Dynamics).	23
Figura 6: Distribució de pressió en un perfil alar (Race car vehicle Dynamics).	24
Figura 7: Components de la força aerodinàmica (Aerodinàmica del automòvil de competició).	25
Figura 8: Comportament de l'aire segons el coeficient de forma (Aerodinàmica del automòvil de competició).	25
Figura 9: Flux laminar i flux turbulent (Aerodinàmica del automòvil de competició).	26
Figura 10: Capa límit.	26
Figura 11: Capa límit laminar i turbulent (Aerodinàmica del automòvil de competició).	27
Figura 12: Despreniment de la capa límit (Race car vehicle Dynamics).	27
Figura 13: Aplicacions de controladors de flux a F1..	28
Figura 14: Generadors de vòrtex en CFD.	28
Figura 15: Generadors de vòrtex en un F1.	28
Figura 16: Fons pla de F1.	31
Figura 17: Parts d'un fons pla.	31
Figura 18: Efecte Venturi.	32
Figura 19: Distribució de pressions en fons pla.	33
Figura 20: Vectors de velocitat en fons pla.	33

Figura 21: Influència de l'altura en el comportament del fons pla.	34
Figura 22: A l'esquerra, esquema d'un difusor ((Aerodinámica del automóvil de competición); a la dreta, doble difusor de BrawnGP al 2009.	34
Figura 23: Fons pla sense difusor.	35
Figura 24: Fons pla amb difusor.	35
Figura 25: Gradient de pressió en el difusor.	36
Figura 26: Deixant d'un vehicle convencional.	36
Figura 27: Distribució de pressió d'un cos simple amb difusor (Race Car Aerodynamics).	37
Figura 28: Volum de control.	40
Figura 29: Malla de simulació.	40
Figura 30: Malla en la capa límit.	41
Figura 31: Representació del residuals.	42
Figura 32: Valors oscil·lants de residuals.	43
Figura 33: Perfil de fons pla.	44
Figura 34: Convergència de malla.	44
Figura 35: Influència de l'angle del difusor, segons Joseph Katz (Race car Aerodynamics).	45
Figura 36: Croquis de la curvatura del difusor.	46
Figura 37: A dalt CAD del xassís, a baix fotografia real.	47
Figura 38: Dimensions generals del fons pla.	48
Figura 39: Primera iteració d'acoblament al xassís.	49
Figura 40: Abraçadora d'alumini.	49
Figura 41: Acoblament mitjançant abraçadores.	50
Figura 42: Plaqueta d'acer.	50

Figura 43: Acoblament mitjançant plaquetes. _____	51
Figura 44: Dimensionament de la placa. _____	51
Figura 45: Posició dels suports. _____	51
Figura 46: Soldadura de suport lateral. _____	52
Figura 47: Soldadura de suport central. _____	52
Figura 48: Conjunt suport-fons pla. _____	53
Figura 49: Barra de fibra en un lateral d'un Formula Student. _____	54
Figura 50: Tensors de cable d'acer. _____	54
Figura 51: Exemple de Quick Jack. _____	55
Figura 52: Conjunt xassís-transmissió. _____	56
Figura 53: Jacking Point entre parets de difusor. _____	56
Figura 54: Vehicle en posició de Quick Jack. Divisió del difusor. _____	57
Figura 55: Sensor de direcció sobresortint del xassís. _____	58
Figura 56: Zona del sensor. _____	58
Figura 57: Dimensions del model. _____	59
Figura 58: Geometria d'estudi. _____	60
Figura 59: Dimensions del volum de control 3D. _____	60
Figura 60: Volum de control 3D. _____	61
Figura 61: Eix de rotació de la roda. _____	61
Figura 62: Malla superficial. _____	62
Figura 63: Error de malla. _____	62
Figura 64: Zona de refinament de la malla. _____	63

Figura 65: Capa límit. _____	63
Figura 66: Malla de simulació 3D (1). _____	64
Figura 67: Malla de simulació 3D (2). _____	64
Figura 68: Aire influenciat per l'aleró davanter (Desarrollo de elementos aerodinámicos del prototipo Formula Student E-tech Racing). _____	66
Figura 69: Distribució de pressions en la superfície del difusor. _____	67
Figura 70: Línies de trajectòria de l'aire sota el fons pla. _____	67
Figura 71: Vectors de velocitat en la zona del difusor. _____	68
Figura 72: Distribució de pressions en la superfície de la roda posterior. _____	69
Figura 73: Distribució de pressions en la perifèria de la roda posterior. _____	69
Figura 74: Aletes en un difusor de F1. _____	70
Figura 75: Aletes al difusor. _____	71
Figura 76: Vòrtex generat per l'aleta del difusor. _____	71
Figura 77: Pestanya a l'aleta del difusor. _____	71
Figura 78: Difusor amb quatre aletes. _____	72
Figura 79: Vòrtex generats per les dues aletes. _____	73
Figura 80: Zones de baixa pressió a les aletes. _____	73
Figura 81: Gradient de pressió al difusor amb aletes. _____	73
Figura 82: Panell vertical davant la roda posterior en un monoplaça de Formula Student _____	75
Figura 83: Panell vertical a roda posterior. _____	75
Figura 84: Gradient de pressió en difusor amb paret vertical a roda. _____	76
Figura 85: Línies de trajectòria de l'aire en el difusor amb la implantació d'un panell vertical davant la roda. _____	76



Figura 86: Distribució de pressió en el panell vertical i roda posterior. _____	77
Figura 87: Exemple d'aplicació de side wings. _____	77
Figura 88: Vectors de velocitat en els side wings. _____	78
Figura 89: Distribució de pressió en la perifèria de la roda posterior 10'. _____	79
Figura 90: A l'esquerra fibra unidireccional; a la dreta fibra de carboni en forma de teixit. _____	80
Figura 91: Fabricació per infusió. _____	81
Figura 92: Fabricació amb fibres prepreg. _____	82
Figura 93: Orientació de fibres i capes segons Ansys. _____	83
Figura 94: Representació de les 4 capes de fibra. _____	83
Figura 95: Representació de les 8 capes de fibra i el PVC foam. _____	84
Figura 96: Deformació en aplicar 50N en un punt. _____	85
Figura 97: Deformació en aplicar 200N en una superfície de 225cm <sup>2</sup> . _____	85
Figura 98: Deformació en aplicar 50N en un punt amb tensor. _____	86
Figura 99: Deformació en aplicar 200N en una superfície de 225cm <sup>2</sup> amb tensor. _____	86
Figura 100: Econobreaker. _____	87
Figura 101: Adhesiu TC42. _____	87
Figura 102: Sangrador P-21. _____	87
Figura 103: Peel ply. _____	88
Figura 104: Tub en espiral. _____	88
Figura 105: Entrada en T. _____	88
Figura 106: Resin epoxy. _____	88
Figura 107: Motlle en el seu estat inicial. _____	89

Figura 108: Capa de 100 g/m <sup>2</sup> .	90
Figura 109: Capa de 400 g/m <sup>2</sup> .	90
Figura 110: Peel ply a la zona del difusor.	91
Figura 111: P21 i reixa de distribució sobre la fibra.	91
Figura 112: Circuit d'entrada i sortida de resina.	92
Figura 113: Realització del buit.	92
Figura 114: Comprovació del buit.	93
Figura 115: Resina cobrint la peça.	93
Figura 116: Nucli de foam en el difusor.	94
Figura 117: Motlles dels divisors.	95
Figura 118: Divisors del difusor.	95
Figura 119: E79 abans de la competició.	96
Figura 120: Monoplça en carrera.	97
Figura 121: Difusor per la part posterior.	97
Figura 122: Vehicle en posició de Quick Jack.	98

# Índex

<b>RESUM</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>AGRAÏMENTS</b>	<b>IV</b>
<b>GLOSSARI</b>	<b>V</b>
<b>LLISTA DE TAULES</b>	<b>VI</b>
<b>LLISTA DE FIGURES</b>	<b>VII</b>
<b>1. PREFACI</b>	<b>17</b>
1.2. Motivació .....	17
1.3. Requeriments previs .....	17
<b>2. INTRODUCCIÓ</b>	<b>21</b>
2.1. Objectius del treball .....	21
2.2. Abast del treball .....	21
<b>3. MARC TEÒRIC</b>	<b>22</b>
3.1. Equació de Bernoulli .....	22
3.2. Les forces implicades .....	24
3.3. Consideracions de flux real .....	26
3.4. Generadors de vòrtex .....	27
3.5. Número de Reynolds .....	29
3.6. Beneficis de la carga aerodinàmica .....	29
<b>4. EL FONS PLA</b>	<b>31</b>
4.1. Efecte Venturi .....	32
4.2. El difusor .....	34
4.3. Interferència amb els alerons .....	37
<b>5. DISSENY 2D DEL FONS PLA</b>	<b>39</b>
5.1. Simulació CFD 2D .....	39
5.1.1. Malla de simulació (2D) .....	40
5.1.2. Condicions inicials .....	44

5.2.	Dimensionament de l'angle del difusor .....	45
5.3.	Dimensionament de la longitud del difusor.....	45
5.4.	Dimensionament de la curvatura del difusor .....	46
<b>6.</b>	<b>DISSENY 3D DEL FONS PLA .....</b>	<b>47</b>
6.1.	Acoblament amb el xassís .....	47
6.1.1.	Suports .....	49
6.1.2.	Divisió central.....	55
6.1.3.	Zona del sensor .....	58
6.2.	Simulació CFD 3D .....	58
6.2.1.	Malla de simulació (3D) .....	62
6.2.2.	Condicions inicials (3D) .....	65
6.3.	Anàlisi del resultats.....	65
6.3.1.	Aletes.....	70
6.4.	Estudi de millores .....	74
6.4.1.	Dimensionament.....	74
6.4.2.	Espai lateral .....	74
6.4.3.	Reducció de la mida de les rodes .....	78
<b>7.</b>	<b>FABRICACIÓ DEL FONS PLA .....</b>	<b>80</b>
7.1.	Composites .....	80
7.1.1.	Fabricació .....	80
7.2.	Simulació de composites .....	82
7.3.	Procés de fabricació.....	86
7.3.1.	Material.....	86
7.3.2.	Encerat i lustrat .....	89
7.3.3.	Laminació .....	89
7.3.4.	Infusió.....	91
7.3.5.	Desemmotllar i preparació final .....	94
7.3.6.	Fabricació de les aletes .....	95
<b>8.</b>	<b>ACTUACIÓ I MANTENIMENT .....</b>	<b>96</b>
<b>9.</b>	<b>ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL .....</b>	<b>99</b>
	<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>101</b>
	<b>PRESSUPOST .....</b>	<b>103</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>105</b>

<b>ANNEX A</b>	<b>107</b>
A1. Taules .....	107



# 1. Prefaci

## 1.2. Motivació

Podria considerar-se que la motivació d'aquest projecte és la Formula Student, la competició educativa d'automobilisme més establerta a Europa. Recolzat per la indústria i enginyers d'alt perfil, la competició té com a objectiu desenvolupar joves enginyers emprenedors i innovadors i encoratjar-ne a nous a fer carrera en enginyeria.

El format de l'esdeveniment és tal, que proporciona una oportunitat ideal perquè els estudiats puguin provar, demostrar i millorar les seves capacitats per oferir un producte complex i integrat en l'entorn exigent d'una competició d'automobilisme.

El projecte sol formar part d'un projecte de nivell de grau i és vist per la indústria de l'automobilisme com a estàndard a seguir pels estudiants graduats d'enginyeria, suposant la transició des de la universitat al lloc de treball. Es tracta de la primera pinzellada en l'experiència en enginyeria en el món real.

## 1.3. Requeriments previs

La Formula Student com a competició presenta cada any un document on recull la normativa que regeix l'esdeveniment. Aquesta normativa abasta temes relacionats amb el disseny, dimensionament o acoblament de les peces que formen el vehicle. Així doncs, el desenvolupament d'aquest projecte sempre afavoreix el compliment d'aquesta normativa i per tant, certes decisions i mesures es justifiquen per aquest motiu. A continuació, és recullen diversos fragments de la normativa que d'una manera o altre afecten al procediment del projecte.

En primer lloc, destacar del punt *T1 General Design Requirements*, on es parla sobre la concepció de vehicle tipus Formula i les característiques principals que ha de presentar. Concretament, es cita l'apartat b del punt T1.1.3, on es detallen els marges d'espai que s'han de deixar a les rodes:

*"No part of the vehicle may enter a keep-out-zone defined by two lines extending vertically from positions 75mm in front of and 75mm behind the outer diameter of the front and rear tires in the side view of the vehicle, with tires steered straight ahead. This keep-out zone will extend laterally from the outside plane of the wheel/tire to the inboard plane of the wheel/tire."*

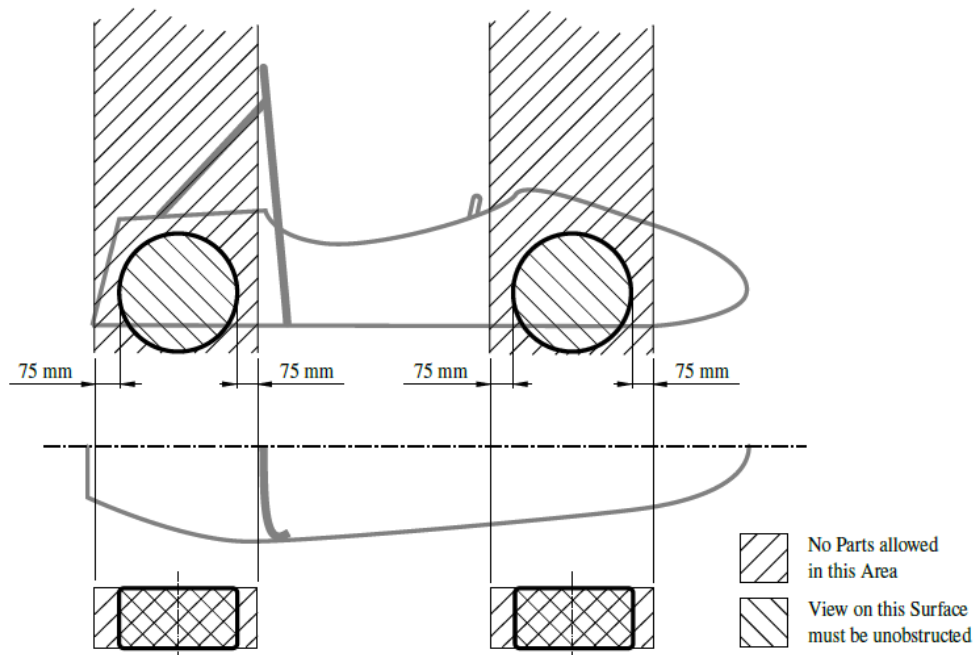


Figura 1: Zona de marge segons la definició de vehicle tipus Formula (FSG Rules 2017).

El punt que més influeix potser en el disseny de qualsevol peça aerodinàmica és l'apartat T7 *Aerodynamics Devices*, on es citen totes les característiques que han de complir els elements aerodinàmics del vehicle. Primerament, el punt T7.2 *Ground Effect Devices*, en el que es prohibeixen tots aquells dispositius alimentats per energia destinats a crear efecte terra:

*"T7.2.1 Power ground effects are prohibited. No power device may be used to move or remove air from under the vehicle except fans designed exclusively for cooling."*

Seguidament, en el punt T7.3 *Restrictions for Aerodynamics Devices* s'especifiquen les restriccions de dimensionament, tant en amplada com en longitud, dels elements aerodinàmics:

*"All aerodynamic devices lower than 500mm from the ground and further rearward than the front axle, must not be wider than a vertical plane touching the outboard face of the front and rear wheel/tire."*

*"All aerodynamic devices must not extent further rearward than 250mm from the rearmost part of the rear tires."*



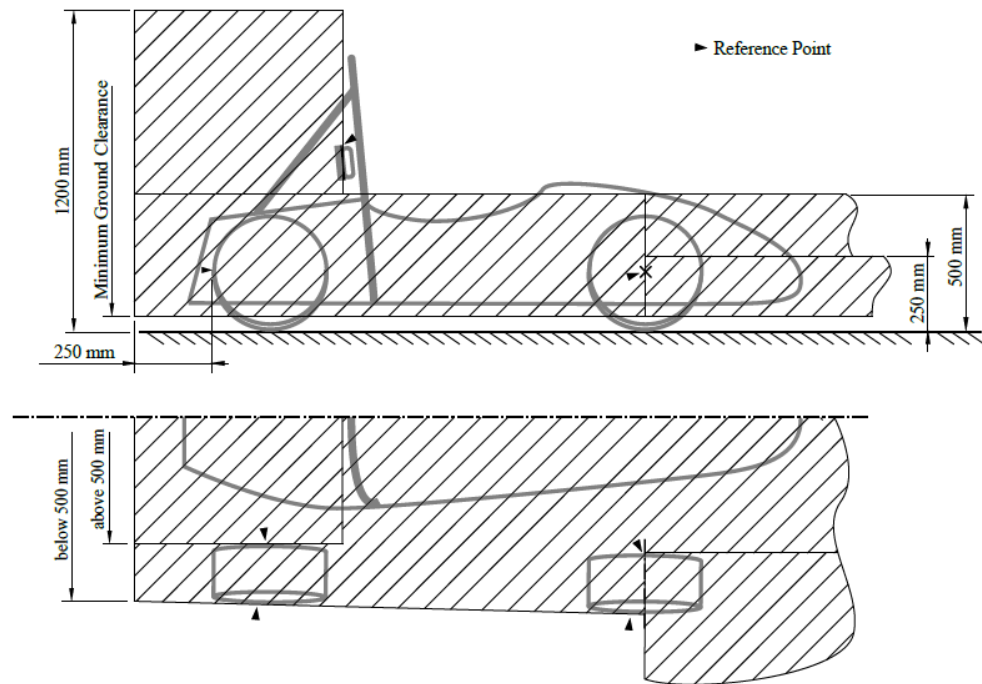


Figura 2: Dimensions màximes i posicionament del elements aerodinàmics (FSG Rules 2017).

Dins el mateix apartat, el punt T7.5 *Aerodynamic Devices Stability and Strength* es parla sobre les característiques d'aquests elements en termes de rigidesa:

*"T7.5.1 Any aerodynamic device must be able to withstand a force of 200N distributed over a minimum surface of 225 cm<sup>2</sup> and not deflect more than 10mm in the load carrying direction."*

*"T7.5.2 Any aerodynamic device must be able to withstand a force of 50N applied in any direction at a point and not deflect more than 25 mm."*

A part de parlar sobre elements aerodinàmics, també s'especifiquen les fixacions que s'han de fer servir per acoblar certes peces al xassís. Es troba en l'apartat *T9 Fasteners* i tracta de tots aquells suports que es trobin a lo que es coneix com a estructura primària (*T2.2 Definitions*):

*"T9.1.1 Critical fasteners are defined as bolts, nuts, and other fasteners utilized in the primary structure, the steering, braking, driver's harness and suspension systems."*

*"T9.1.5 Any bolted joint in the primary structure using either tabs or brackets, must have an edge distance ratio "e/D" of 1:5 or greater. "D" equals the hole diameter and "e" equals the distance from the hole centreline to the nearest free edge of the tab or bracket. Any tabs attaching suspension members to the primary structure are not required to meet this rule."*

*“T9.2.1 All critical fasteners must be secured from unintentional loosening by the use of positive locking mechanisms.”*

Finalment, cal remarcar l'apartat T12.2 Quick Jack que, tot i no ser un element del vehicle en si, afectar la disseny d'aquest projecte:

*“T12.2.1 Each team must have removable devices (called the quick jacks) that lift up the vehicle, so that all driven wheels are at least 100mm off the ground and the vehicle is adequately supported.”*

## 2. Introducció

### 2.1. Objectius del treball

L'objectiu d'aquest projecte és el de crear un document que serveixi com a punt de partida per qualsevol persona que vulgui iniciar-se en la producció d'un element aerodinàmic com el fons pla per a Formula Student. La idea és la de fer una guia on es recullin els passos a seguir en el desenvolupament d'un fons pla, així com els aspectes a considerar per a millorar el seu rendiment.

Com a objectiu paral·lel i específic de la peça estudiada, aconseguir un resultat òptim en termes de *downforce* o força de sustentació negativa. En no conèixer el valor de *downforce* que es pot arribar a generar no s'estableix una xifra concreta a assolir, sinó que es busca una valoració benefici-inconvenients positiva en el comportament del vehicle. A més a més, s'estableix com a objectiu aconseguir el mínim pes possible sense posar en compromís la integritat de la pròpia peça. Finalment, i com a objectiu últim, fer realitat el disseny concebut mitjançant la seva fabricació i acoblament a un vehicle de Formula Student real.

### 2.2. Abast del treball

El treball abasteix totes les etapes de desenvolupament d'un fons pla per a Formula Student, des del disseny fins a la fabricació. Primerament, es realitza un estudi del comportament aerodinàmic del fons pla en general, per passar després a l'etapa de disseny en la qual s'especifiquen les dimensions de la peça a produir. Es realitzen també anàlisis de dinàmica de fluid computacional (CFD) per trobar la geometria òptima segons el comportament de l'aire. En aquest projecte varies alternatives són estudiades i proposades com a millores per propers dissenys.

De la mateixa manera, s'estudien també diverses opcions per l'acoblament a un xassís real, com la posició o dimensionament dels suports. Pel que fa a la fabricació, s'introdueix a la simulació de fibres, es plantegen mètodes de fabricació i es posen en pràctica. Finalment, es realitza una valoració del comportament de la peça en competició.

### 3. MARC TEÒRIC

L'aerodinàmica, entesa com la branca de la mecànica de fluids que estudia el moviment de l'aire i altres gasos, i la seva interacció amb altres cossos que es mouen en ells, ha sigut una de les àrees d'estudi que més han influenciat en el rendiment dels vehicles de competició. L'impacte ha sigut tal, que a hores d'ara tota competició automobilística compta amb una extensa normativa respecte aquesta disciplina. Un bon estudi de l'aerodinàmica pot arribar a millorar considerablement el comportament del cotxe i pot influenciar en aspectes com la velocitat màxima, pas per corba, acceleració o frenada.

#### 3.1. Equació de Bernoulli

Tot i ser una disciplina actual, els primers estudis sobre aerodinàmica es daten segles enrere. Personatges com Aristòtil o Isaac Newton van intentar donar respostes plausibles sobre el comportament de l'aire o l'aigua. Tot i així, no va ser fins el 1755 on el físic italià Daniel Bernoulli va trobar una relació directa entre pressió i velocitat. Aquest raonament es manifesta en l'equació de Bernoulli:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = cte = H \quad [\text{Eq. 1}]$$

La pressió estàtica ( $p$ ) fa referència a la pressió generada pel fluid estàtic i depèn del pes específic i de l'altura del nivell del fluid. La pressió estàtica es pot mesurar mitjançant un manòmetre del tipus U instal·lat, per exemple, a la paret d'un túnel de vent o a la superfície d'un cos en contacte amb un flux d'aire. Com es pot veure en la Figura 3, el requeriment principal per mesurar la pressió estàtica és que el punt de mesura sigui independent i aïllat del flux en velocitat.

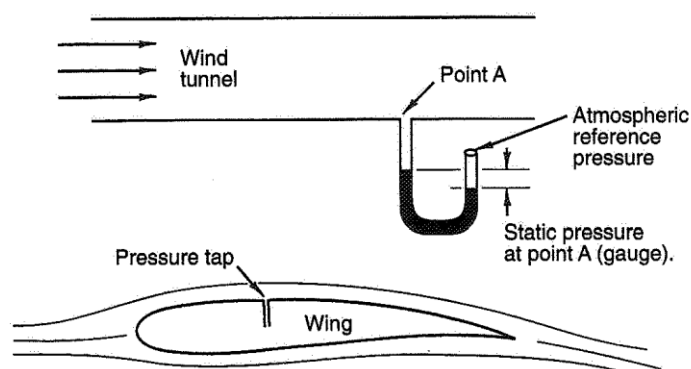


Figura 3: Mesura de pressió estàtica (Race car vehicle Dynamics).

La pressió dinàmica ( $\frac{1}{2}\rho v^2$ ) és la pressió que s'origina com a conseqüència de la velocitat a la que circula el fluid, on " $\rho$ " és la densitat del flux i " $v$ " és la velocitat. Podria dir-se que la pressió dinàmica és la que es produiria si l'energia cinètica del fluid en moviment, en un punt donat, es convertís en pressió. Si una superfície plana s'interposés al pas d'un flux d'aire en un cert angle, respecte les línies de flux, com s'observa en la Figura 4, les partícules situades al centre del flux es desaccelerarien en xocar amb la superfície i la seva energia cinètica donaria lloc a un increment de la pressió estàtica en aquell punt.

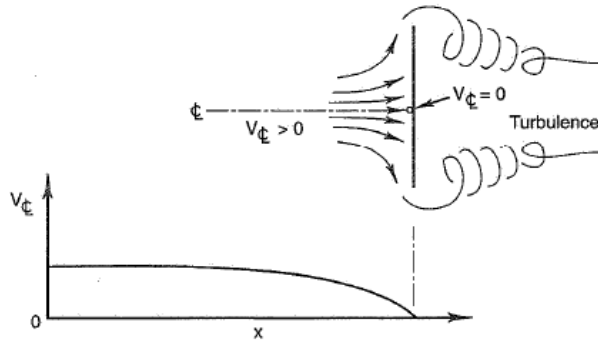


Figura 4: Interferència de superfície plana amb un flux d'aire (Race car vehicle Dynamics).

La pressió total ( $H$ ) és la suma de la pressió estàtica i dinàmica, que segons Bernoulli, mantenen una relació constant en un mateix sistema. Tot i que no es contemplen pèrdues en aquest cas, aquesta equació forma la base per entendre el comportament de l'aire i podria resumir-se com: on el flux assoleix la major velocitat, la pressió assoleix el seu mínim.

L'exemple d'aplicació d'aquest principi es troba en el pas d'aire per un perfil alar o *airfoil*. Un perfil alar o aerodinàmic, és un dispositiu que fa servir els canvis de pressió per generar força. En el cas de la Figura 5, l'aire que circula per sobre de l'ala, on es troba la màxima curvatura, ha de viatjar una distància major per arribar des de la vora d'atac fins la vora de sortida que l'aire que va per sota de l'ala. Així doncs, l'aire que ha de prendre el camí més llarg s'accelera i adquireix major velocitat. Major velocitat, com explica Bernoulli, suposa menor pressió. És aquesta diferència de pressions entre la part superior i la inferior la que crea la força de sustentació que permet, per exemple, enlairar-se a un avió. En el cas de ser un fluid ideal, en el que no existeixen pèrdues per fregament, no apareixeran components de forces tangencials, i la pressió es distribuirà perpendicular a la superfície com es mostra a la Figura 6.



Figura 5: Flux d'aire a través d'un perfil alar (Race car vehicle Dynamics).

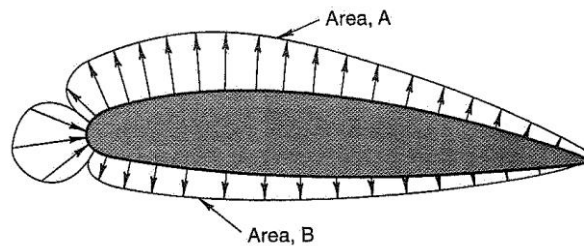


Figura 6: Distribució de pressió en un perfil alar (Race car vehicle Dynamics).

L'equació de Bernoulli diu que l'energia cinètica o pressió dinàmica d'un flux d'aire pot ser intercanviada per pressió estàtica. La pressió estàtica és la que exerceix força sobre una superfície, que pot ser utilitzada com a sustentació. Aquesta força està limitada doncs per la magnitud de la pressió dinàmica disponible. Tenint present l'equació de Bernoulli, sabem que aquesta energia creix amb el quadrat de la velocitat i directament amb la densitat de l'aire.

L'efectivitat de la conversió de pressió dinàmica a pressió estàtica, i conseqüentment a força, depèn de la forma del cos pel que circula el flux, poden també controlar la direcció d'aquesta com ens interressi. En el cas de vehicles de competició es fan servir perfils alars invertits, ja que el que es pretén es crear una força en direcció al sòl i així augmentar l'adherència del cotxe.

### 3.2. Les forces implicades

Les dues components de la força aerodinàmica són resistència (*drag*) i sustentació (*lift*), que es combinen entre si com vectors per donar la força aerodinàmica total resultant. Les diferències de pressió poden expressar-se matemàticament com el coeficient de pressió ( $C_p$ ) multiplicat per la pressió dinàmica:

$$p = C_p * \frac{1}{2} \rho v^2 \quad [\text{Eq. 2}]$$

Per convertir una pressió en una força, és necessari multiplicar-la per l'àrea sobre la que la pressió actua:

$$\text{Pressió} = \frac{\text{Força}}{\text{Àrea}} \quad [\text{Eq. 3}]$$

Així doncs, de la equació de la pressió, podem establir equacions per la sustentació i resistència de la següent manera:

$$F_{\text{Sustentació}} = C_L * \frac{1}{2} \rho v^2 * A \quad [\text{Eq. 4}]$$

$$F_{Resistència} = C_X * \frac{1}{2} \rho v^2 * A \quad [\text{Eq. 5}]$$

On  $C_L$  és el coeficient de sustentació,  $C_X$  és el coeficient de resistència i  $A$  és l'àrea, que per vehicles es fa servir l'àrea frontal tant per sustentació com per resistència. En la Figura 7 es representen les corresponents components de la força aerodinàmica.

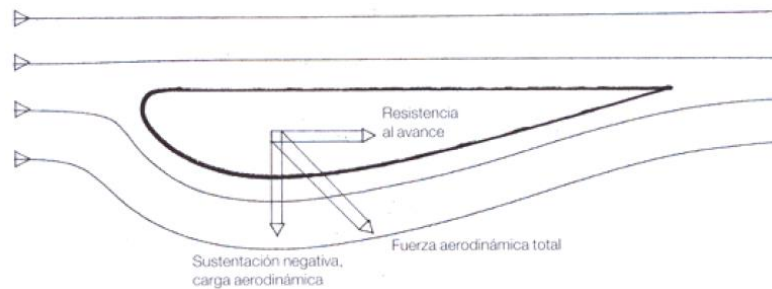


Figura 7: Components de la força aerodinàmica (Aerodinàmica del automòbil de competició).

Els coeficients de sustentació i resistència són mesures relatives de quanta sustentació i resistència pot generar un cos. Per una banda, la resistència ve donada per l'oposició d'un cos al pas de l'aire segons la seva forma. És intuïtiu pensar, com demostra la Figura 8, que una placa situada perpendicularment al pas d'un flux, oposarà més resistència que un cos, de mateixa àrea frontal, però en forma de gota. De la mateixa manera, el coeficient de sustentació també vindrà donat per la forma del cos a estudiar, encara que en aquest cas no es presenta de manera tant intuïtiva.

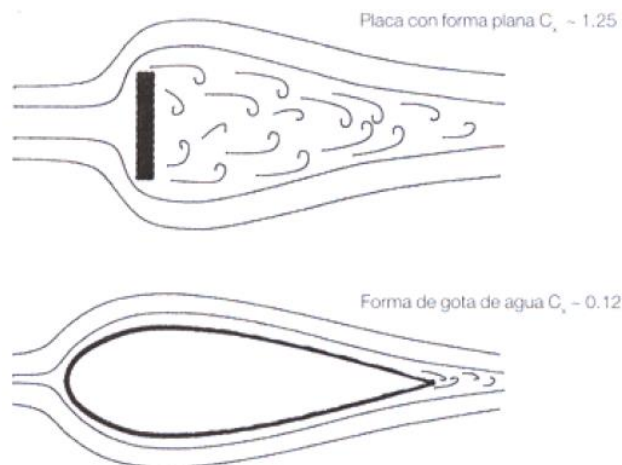


Figura 8: Comportament de l'aire segons el coeficient de forma (Aerodinàmica del automòbil de competició).

### 3.3. Consideracions de flux real

Fins ara, s'ha considerat l'aire com un fluid ideal que circula per un cos sense fregament i amb un comportament laminar. Un flux laminar és aquell en que les seves partícules es mouen en la mateixa direcció que la velocitat i que les línies de flux. Quan, en canvi, les partícules viatgen de forma erràtica i interaccionen entre elles, es diu que presenten un comportament turbulent.

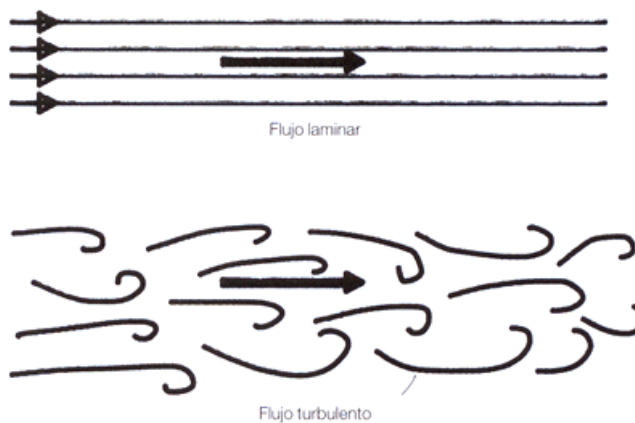


Figura 9: Flux laminar i flux turbulent (Aerodinàmica del automòbil de competició).

Com que l'aire és un fluid viscos, quan circula a través d'un cos es generen certes forces de fregament intern. Les partícules que es troben en contacte amb la superfície del cos reben l'efecte d'aquesta força i són frenades. Considerant el flux d'aire com una superposició de capes de partícules d'aire, l'efecte del fregament es trasllada capa a capa, però de manera menys intensa a mesura que s'allunya de la superfície fins que aquest desapareix. Així doncs, existeix una capa en contacte amb un cos en la que apareix un gradient de velocitat, que es zero en la superfície, i es coneix com a capa límit.

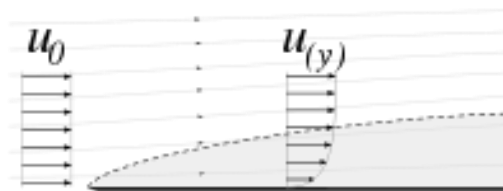


Figura 10: Capa límit.



Si les diferències de velocitats entre subcapes de la capa límit són petites, la interacció entre elles serà mínima, per lo que serà una capa límit laminar. Si, en canvi, apareixen diferències considerables de velocitat i les subcapes no llisquen unes amb les altres, es dirà que és una capa límit turbulent.

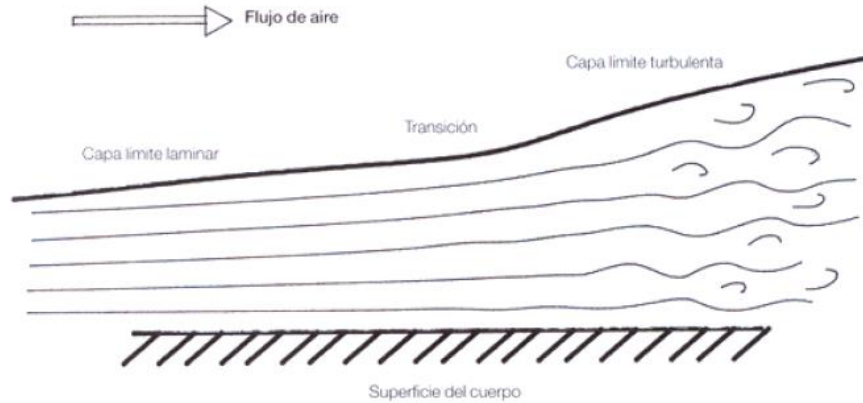


Figura 11: Capa límit laminar i turbulent (Aerodinàmica del automòbil de competició).

Segons la forma de la superfície per la que circula el flux i l'energia que aquest perdi en el procés, el gradient de velocitat pot arribar a ser negatiu, fet que provoca la separació del flux. Aquest efecte, en aerodinàmica de competició, no és desitjable ja que redueix la carga aerodinàmica i augmenta la resistència.

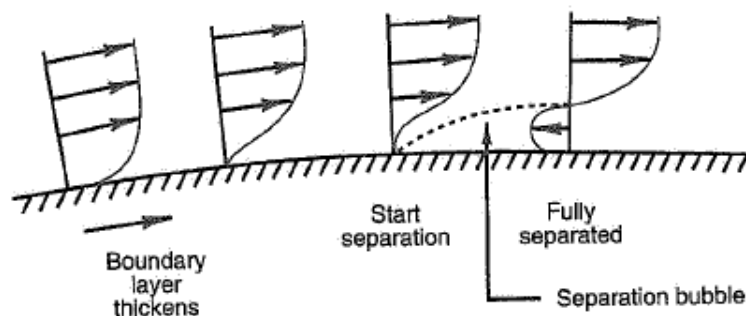


Figura 12: Despreniment de la capa límit (Race car vehicle Dynamics).

### 3.4. Generadors de vòrtex

Existeixen certs dispositius de control de flux que s'utilitzen per aconseguir canvis desitjables en les forces aerodinàmiques i moments en el vehicle i per controlar el flux d'aire intern per la refrigeració dels motors, frens, transmissió i ventilació del pilot. Alguns dels dispositius influeixen en la capa límit; altres afecten el flux remot. La majoria d'aquest dispositius són utilitzats en enginyeria aeronàutica, tot i així, molts han sigut aplicats i adaptats per la indústria d'automobilisme de competició.



Figura 13: Aplicacions de controladors de flux a F1..

Un dels dispositius més utilitzats és el generadors de vòrtex que, com el seu nom indica, tenen com a objectiu principal la creació de vòrtex. Un vòrtex, entès com a flux d'aire en rotació, indueix velocitat a certa distància del seu eix de rotació i presenten una zona de baixa pressió en el seu nucli. La funció principal és donar energia a l'aire en la capa límit per retardar la separació del flux. Això s'aconsegueix mitjançant la barreja de l'aire en la capa límit i l'aire a alta velocitat en el flux lliure.

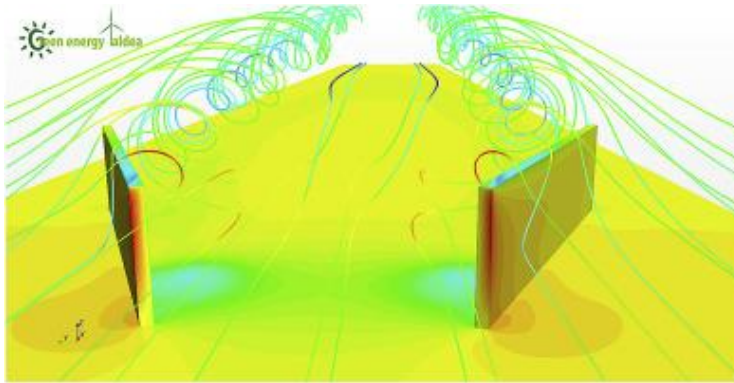


Figura 14: Generadors de vòrtex en CFD.



Figura 15: Generadors de vòrtex en un F1.

### 3.5. Número de Reynolds

La condició bàsica de similitud entre un model i un vehicle a escala real és que ambdós tinguin el mateix Número de Reynolds, que respon a aquesta equació:

$$Re = \frac{\rho * v * L}{\mu} \quad [\text{Eq. 6}]$$

On  $\rho$  és la densitat de l'aire,  $v$  és la velocitat,  $L$  és una longitud apropiada per caracteritzar el patró del flux, com la longitud d'un cotxe o la dimensió de la corda, i  $\mu$  és la viscositat. Per assegurar que un patró de flux és similar entre un test a escala real i un model, el Número de Reynolds hauria de ser igual o al menys el més proper possible.

El Número de Reynolds no només és un mètode de comparar dades, obtingudes a diferents velocitats i diferents escales, sinó que també pot utilitzar-se com a indicador de si un flux serà laminar o turbulent. En general, un flux es torna turbulent amb l'augment de la velocitat, a més de amb l'augment de longitud. Per tant, un Número de Reynolds alt pot indicar que el flux és turbulent.

### 3.6. Beneficis de la carga aerodinàmica

La carga aerodinàmica és molt important en enginyeria de competició perquè, tot i tenir el handicap de la resistència addicional, permet assolir major velocitats en corba i, per tant, reduir el temps per volta. Per simplificar el raonament, tot es pot reduir al fregament i l'adherència.

Per una banda, la força de fregament o fricció entesa com el coeficient de fricció ( $\mu$ ), del neumàtic en aquest cas, per la força normal ( $N$ ), que és igual al pes del cotxe:

$$F_{\text{fricció}} = \mu * N \quad [\text{Eq. 7}]$$

Per altra banda, la força centrípeta que manté a un cos movent-se en un traçat circular:

$$F_{\text{centrípeta}} = \frac{(m * v^2)}{r} \quad [\text{Eq. 8}]$$

On  $m$  és la massa del cos,  $v$  la velocitat i  $r$  el radi de la corba.

Sabent que la força de fricció equilibra la força necessària per mantenir el traçat circular, podem igualar les dues equacions i aïllar la velocitat:

$$v = \sqrt{\frac{\mu * N * r}{m}} \quad [\text{Eq. 9}]$$

La carga aerodinàmica, també concebuda com força de sustentació, és aquella força que exerceix l'aire sobre el cos i que es mostra, en el cas del vehicles de competició, perpendicular i en direcció a la superfície per on circula. Aquesta força es sumarà al pes del vehicle i, per tant, incrementarà el valor de la força normal. Així doncs, observant l'equació 9, podem deduir que un augment de la força normal (N), i sabent que els altres factors es mantenen invariables, la velocitat en que es podrà agafar la corba en qüestió serà major.

## 4. EL FONS PLA

El fons pla és aquell element aerodinàmic que es troba a la part inferior del monoplaça i fa servir la poca distància entre el vehicle i el terra per crear carga aerodinàmica. La idea darrera d'un fons pla és la de, mitjançant l'efecte venturi, accelerar l'aire per sota del monoplaça per així aconseguir una gran zona de baixa pressió que, amb l'alta pressió per sobre, formarà *downforce* o força de sustentació negativa. A més, el fons pla és l'element aerodinàmic amb millor relació resistència-sustentació, ja que en el seu cas la resistència que oposa a l'aire és pràcticament nul·la.



Figura 16: Fons pla de F1.

En el fons pla podria diferenciar-se tres zones: l'entrada o *inlet*, a la part davantera i encarregada d'enviar l'aire a la zona més baixa del monoplaça, el coll o *throat*, zona plana on l'aire assoleix el seu mínim de pressió, i el difusor, dispositiu situat a la part posterior encarregat de donar sortida a l'aire sota el vehicle i millorar el rendiment de tot el conjunt.

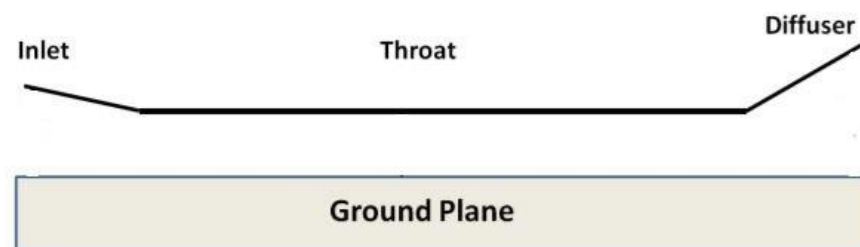


Figura 17: Parts d'un fons pla.

## 4.1. Efecte Venturi

L'efecte Venturi consisteix en fer servir canvis en la secció del conducte per on circula un flux per canviar així la seva velocitat en certs punts i, com s'ha explicat abans, també la seva pressió. Pel que fa al fons pla, l'efecte és el mateix; tot i no trobar-se en un conducte, si s'imagina el sistema en dues dimensions, l'aire que circula lliurement serà el que es trobarà amb el fons pla que reduirà la seva secció, fet que farà augmentar la seva velocitat i reduir la seva pressió.

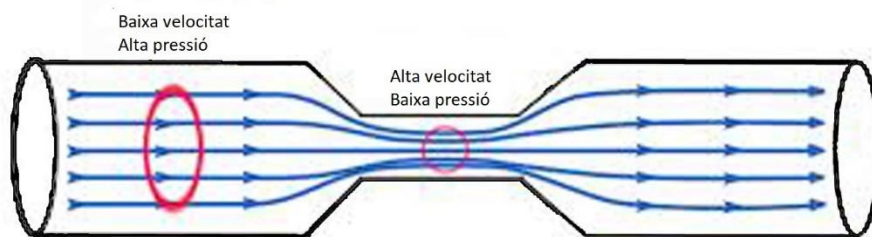


Figura 18: Efecte Venturi.

Tot comença amb l'equació de la continuïtat, la qual explica que la quantitat de massa dins d'un determinat volum de control no varia, per tant, la massa que entra ha de coincidir en tot moment amb la que surt. Traduït a equació queda:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$$

$$\rho_1 * Q_1 = \rho_2 * Q_2 = \rho * Q$$

Sabent que en el nostre cas la densitat roman constant en tot moment:

$$Q = V_1 * S_1 = V_2 * S_2 \quad [\text{Eq. 10}]$$

Observant aquesta equació, on  $V$  és la velocitat i  $S$  la secció per on circula l'aire, podem deduir que si la secció disminueix, la velocitat augmentarà. Aquest equació combinada amb l'equació 1 permet saber que aquest canvi de secció donat per la distància que hi ha entre fons pla i el terra, dona lloc a aire a alta velocitat i a baixa pressió.

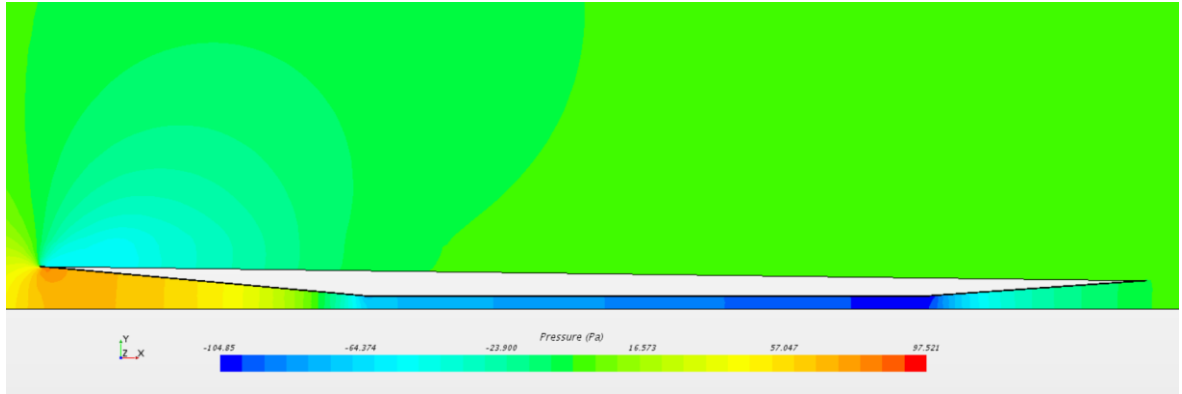


Figura 19: Distribució de pressions en fons pla.

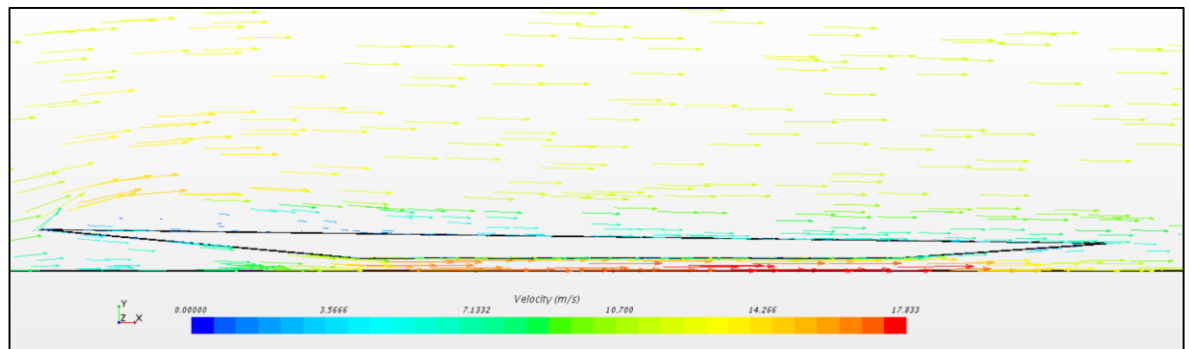


Figura 20: Vectors de velocitat en fons pla.

Així doncs, un dels aspectes que més influirà en el rendiment del fons pla en termes aerodinàmics, és l'altura a que es troba respecte al terra. Tot i així, s'ha de tenir present que no sempre es compleix que a menors altures menors valors de  $C_l$  i, per tant, més *downforce*. A la Figura 21, es representen els resultats obtinguts en simulacions CFD d'un perfil de fons pla a diverses altures. Tota la informació sobre simulacions 2D es troba en l'apartat 5 d'aquest projecte. Es tracta d'una gràfica altura- $C_l$  on es demostra que per altures molt baixes els valors de  $C_l$  augmenten fins arribar a valor positius. Això és degut a que a certes altures la capa límit de l'aire interfereix amb la superfície del terra, quedant així bloquejat per si mateix.

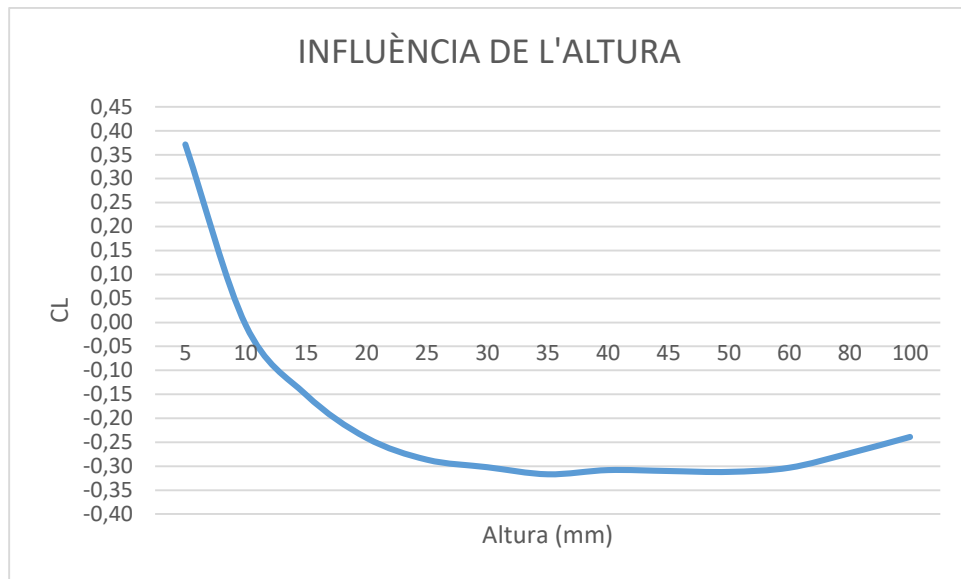


Figura 21: Influència de l'altura en el comportament del fons pla.

A conseqüència de l'efecte Venturi, es genera doncs el conegut efecte terra. En tenir una zona de baixa pressió en la part inferior del monoplaça, es genera una zona de buit que succiona el vehicle cap al terra, formant *downforce*. Aconseguir majors velocitats sota el vehicle implica reduir en major grau la pressió, agreujant aquest efecte i, per tant, obtenint majors valor de *downforce*.

## 4.2. El difusor

El difusor és l'expansió del fons pla que es troba a la part final d'aquest i incorpora un increment en l'angle de desviació. La seva funció és la d'obrir la part posterior del flux del fons pla, donar sortida a aquell aire a baixa pressió sota el vehicle i retornar-lo a la pressió ambient.

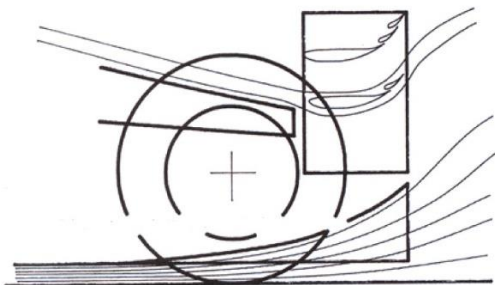


Figura 22: A l'esquerra, esquema d'un difusor ((Aerodinàmica del automòbil de competició); a la dreta, doble difusor de BrawnGP al 2009.



A diferència del que es podria pensar, el difusor no és el que genera tota la *downforce* del fons pla, sinó que és el que permet que el propi fons pla en generi, millorant el seu comportament i eficiència total. Observant les Figures 23 i 24, es pot comparar la representació de pressions en 2D entre un fons pla sense i amb difusor. En el cas del fons pla sense difusor, es genera un CI positiu de 0,25, el que indica que no s'està produït cap mena de *downforce*. En canvi, en el fons pla amb difusor, la pressió per sota disminueix i el CI és, en aquest cas, de -0,47.

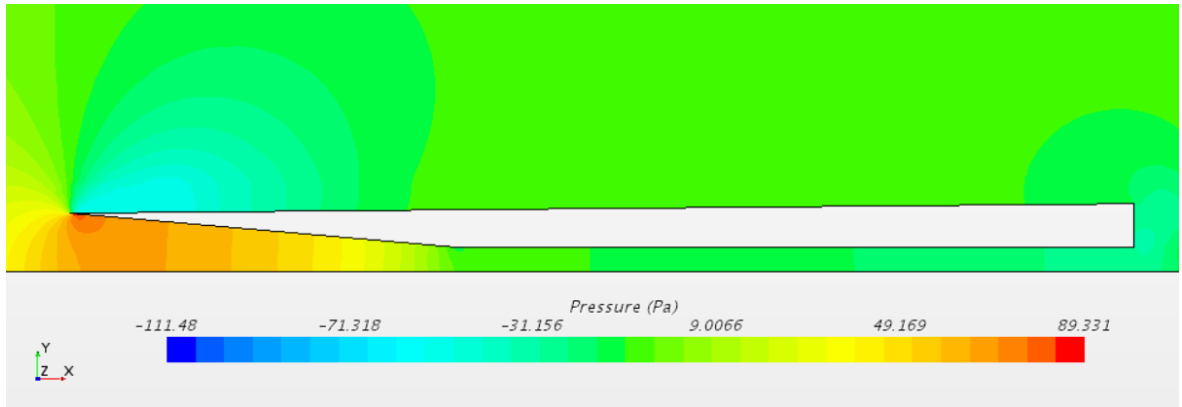


Figura 23: Fons pla sense difusor.

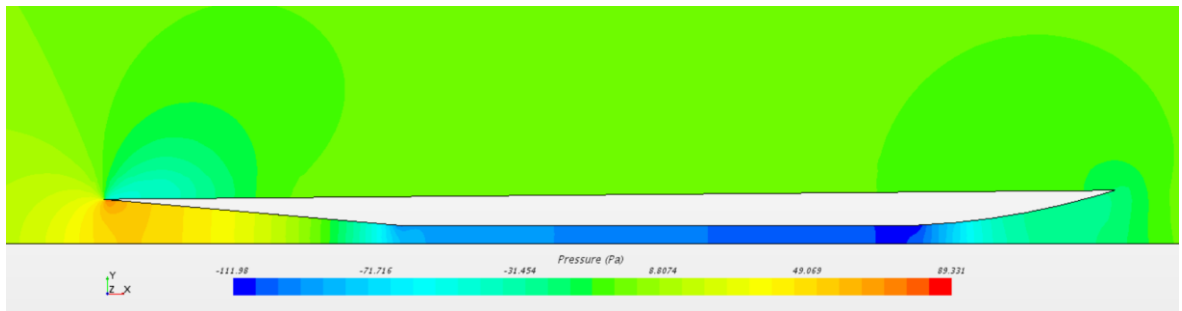


Figura 24: Fons pla amb difusor.

Els fluids flueixen, per naturalesa, de manera més fàcil des d'àrees d'alta pressió a àrees de baixa pressió. Tot i això, en el cas del fons pla, l'aire que s'accelera en la zona de baixa pressió ha de frenar-se segons augmenta la pressió, per l'acció del difusor, i retornar a l'exterior. Es produeix doncs un gradient de pressió adversa.

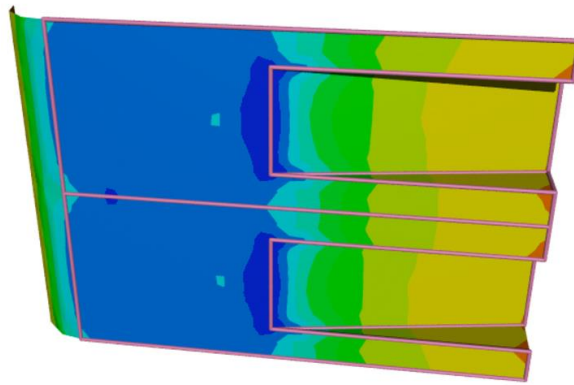


Figura 25: Gradient de pressió en el difusor.

L'acció del difusor no només augmenta la *downforce*, sinó que també permet la reducció de la força de resistència o *dragforce*. Per una banda, en vehicles la força de resistència ve donada per la força de fregament que es genera entre la superfície del vehicle i les molècules del fluid. Aquesta força és influïda per les propietats de ambdós components; pel que fa al sòlid, l'acabat de la superfície i per part del fluid, la seva viscositat.

Per altra banda, la *dragforce* també és deguda a l'acció de la pressió sobre la superfície i està composta per dues components: la força d'oposició que genera l'aire en xocar amb el vehicle en la part frontal i la força de succió de la zona de baixa pressió que es crea a la part posterior del vehicle, on es genera el deixant. Així doncs, l'aire que el difusor extreu i retorna a l'exterior, s'encarrega també de compensar els efectes del deixant i reduir les conseqüències que suposen sobre el vehicle.

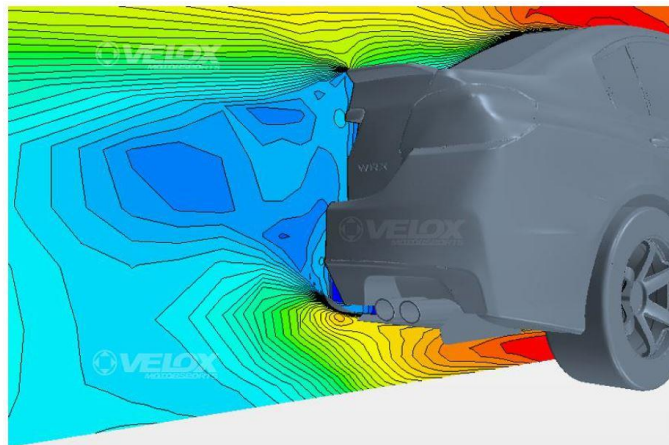


Figura 26: Deixant d'un vehicle convencional.

Un dels aspectes importants del difusor es la influència que pot tenir sobre el centre de pressions. El centre de pressions o Cop és aquell punt on els moments de les forces aerodinàmiques s'igualen a zero. Situar el centre de pressions a una certa distància respecte el centre de gravetat del vehicle, pot influir

molt en la dinàmica i comportament d'aquest en pista. Com es pot observar en la Figura 27, es produeix un pic de pressió en el punt on comença el difusor, que és on l'aire assoleix la màxima velocitat. Moure la localització de l'entrada del difusor pot donar peu a desplaçar el centre de pressions del monoplaça.

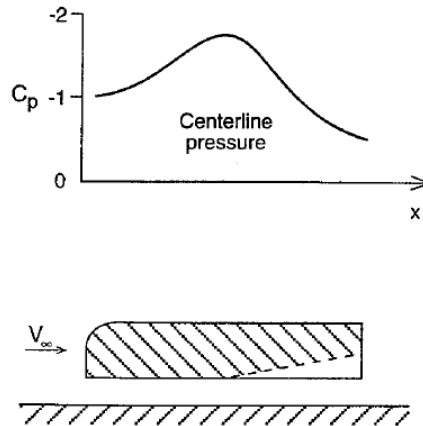


Figura 27: Distribució de pressió d'un cos simple amb difusor (Race Car Aerodynamics).

L'eficiència d'un difusor ve donada, en part, per l'angle de curvatura que presenta. En general, es desitja tenir el major angle sense que es produeixi la separació del flux i generar així la màxima *downforce*. La separació del flux suposa una reducció de la *downforce* i un augment de la *dragforce*. Tot i així, s'espera que la màxima *downforce* es trobi en angles d'entre  $5^\circ$  a  $10^\circ$ . La longitud del difusor també pot influir en la seva eficiència, ja que un major difusor pot donar lloc a una major capacitat d'extracció d'aire sota el vehicle.

### 4.3. Interferència amb els alerons

L'aleró davanter té una gran influència en el comportament del fons pla, ja que és l'encarregat de canalitzar aire net i sense turbulència sota el vehicle. Aquest aire net sota el fons pla preveu la separació del flux al difusor, que afectaria negativament al seu rendiment. Un dels aspectes importants respecte l'aleró davanter és l'altura a que es troba del terra. La carga aerodinàmica produïda per l'aleró augmenta segons aquest s'apropa al terra ja que, per efecte Venturi, la reducció de pressió és major entre l'aleró i el terra de lo que seria davall l'aleró amb l'aire circulant lliurement. Això es compleix fins el punt on la capa límit interfereix amb el terra i bloqueja el flux que passa per davall l'aleró. Aquest aspecte s'ha de tenir molt present, pel fet de que el capcineig del vehicle pot donar lloc a la modificació d'aquesta altura creant cargues aerodinàmiques variables i perjudicant el pas del flux sota el monoplaça.

Per altra banda, l'aleró posterior també té un gran impacte en les prestacions del fons del cotxe. En els vehicles tipus Formula amb rodes descobertes, l'aleró posterior té una gran influència en la creació del

deixant. Com s'ha explicat abans, el difusor s'encarrega de compensar els efectes del deixant amb l'aire que passa per sota del monoplaça. De fet, és la baixa pressió que es genera sota l'aleró la que ajuda a succionar el flux d'aire del difusor, millorant el seu rendiment total.

## 5. Disseny 2D del fons pla

El primer pas per al disseny d'un fons pla és trobar aquell perfil que, segons les característiques del vehicle, presenti la major *downforce*. Es tracte de trobar una primera iteració de les dimensions de les parts anteriorment esmentades: *inlet*, *throat* i difusor. En el cas objecte d'aquest treball, per motius de prioritats d'equip, l'*inlet* i *throat* estan determinades per la geometria del xassís. De la mateixa manera, l'altura a la que es troba també ve determinada per la geometria de suspensions; en aquest cas, a 45 mm del terra. Així doncs, el que es busca en aquest disseny és el dimensionament més òptim del difusor. Pel disseny del perfil del fons pla s'ha fet servir el programa de disseny Solidworks 2016.

S'ha de tenir present que en ser un estudi 2D les interferències amb la resta d'elements són omeses, per lo que aquest disseny només serveix com a referència a seguir pel disseny definitiu en tres dimensions.

### 5.1. Simulació CFD 2D

Per a poder analitzar el comportament de l'aire en el pas per una certa superfície s'han fet servir simulacions CFD (*computational fluid dynamics*), realitzades mitjançant el software Star CCM+. El CFD és una branca de la mecànica de fluids que utilitza mètodes numèrics i algorismes per resoldre i analitzar problemes sobre el flux de fluids. Les simulacions permeten visualitzar la pressió, velocitat, coeficient de sustentació, de resistència i moltes altres propietats d'interès del fluid, en condicions determinades.

La simulació CFD està formada pel volum de control i per la geometria a estudiar. El volum de control és la zona que es delimita com a zona d'estudi de l'aire, és a dir, el volum d'aire que influeix en la simulació. S'especifiquen aquí les condicions inicials de la simulació com les propietats de l'aire a estudiar, la seva velocitat d'entrada o la pressió de sortida.

Les dimensions del volum de control són determinades en funció de la longitud de la geometria a estudiar ( $L=2,55$  m). És important tenir una gran extensió en la part posterior per poder així analitzar correctament el comportament del deixant.

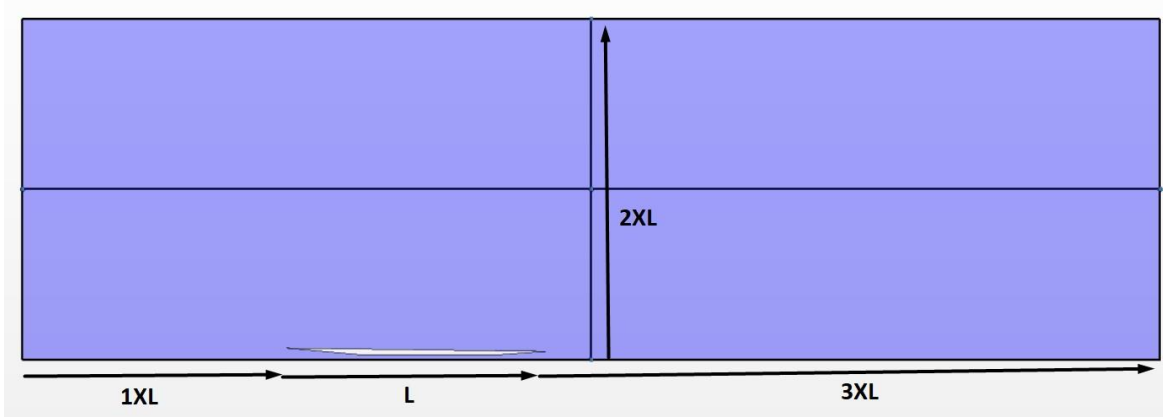


Figura 28: Volum de control.

### 5.1.1. Malla de simulació (2D)

Les equacions diferencials que regeixen el flux d'un fluid no permeten donar solucions analítiques excepte en casos molt senzills. Per tant, per analitzar-ho, el domini es divideix en subdominis en formes geomètriques primitives com triangles, tetraedres o poliedres. Les equacions de govern són llavors discretitzades i resoltes dins de cadascun d'aquests subdominis. El conjunt d'aquest subdominis s'anomena malla. Per aquestes simulacions s'ha escollit utilitzar elements polièdrics ja que, segons la literatura, és la que millor resultat pot donar.

La malla de simulació es troba en tot el volum de control i en la superfície de la geometria. La mida de cada element es redueix en funció de la proximitat a que es trobi del cos a estudiar, ja que és allà on el fluid és veu més influenciat. Es genera doncs, una zona de refinament en les proximitats de la geometria i el deixant per valorar millor els canvis que es provoquen en el fluid. En la Figura 29, els elements de la zona exterior arriben a ser de 500 mm, mentre que en les zones més properes són de 10 mm.

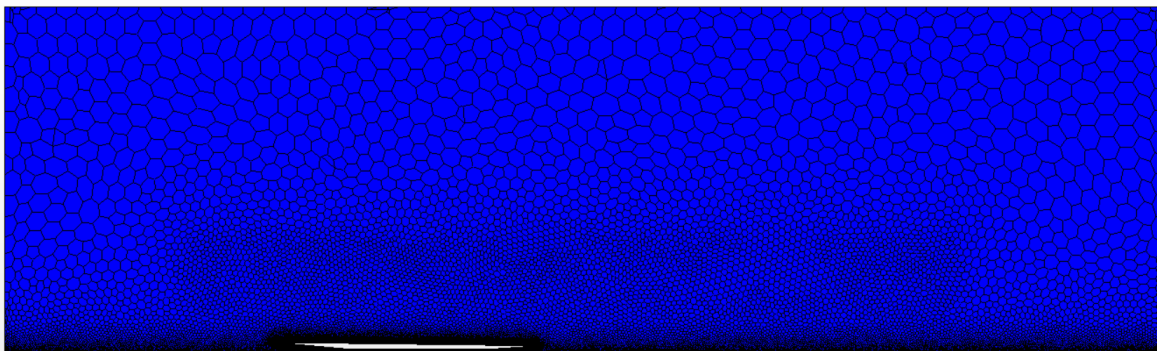


Figura 29: Malla de simulació.

#### 5.1.1.1. Capa límit

Com s'ha explicat abans, la capa límit és un dels factors més importants per entendre el comportament de l'aire. Es per això que en les simulacions CFD s'ha de tenir una especial cura en la determinació de les dades en aquesta zona. D'aquí surt el valor " $Y^+$ ".

$Y^+$  és una distància adimensional que s'utilitza per descriure com de gruixuda o fina es una malla per a un flux concret. Serveix per determinar la distància des de la superfície del cos que es considera turbulent. Les subdivisions de la regió pròxima a la paret en una regió turbulenta poden dividir-se de la següent forma:

- $Y^+ < 5$ : Regió viscosa de la subcapa. Es suposa que el perfil de velocitats és laminar i els esforços viscosos dominen els esforços tallant en la paret.
- $5 < Y^+ < 30$ : Dominen els esforços viscosos i tallants turbulents
- $30 < Y^+ < 300$ : Correspon a la regió on els esforços tallants turbulents dominen.

Per les simulacions que componen aquest projecte s'ha escollit un valor de  $Y^+5$  per trobar resultats precisos en la capa límit del cos a estudiar. Tenint present aquest factor s'han establert els següents valors pel dimensionament de les cel·les en la zona de la capa límit:

- Distància de la primera capa:  $1,97472E-4$  m
- Número de capes: 31
- Distància total de la capa límit: 0,05345 m

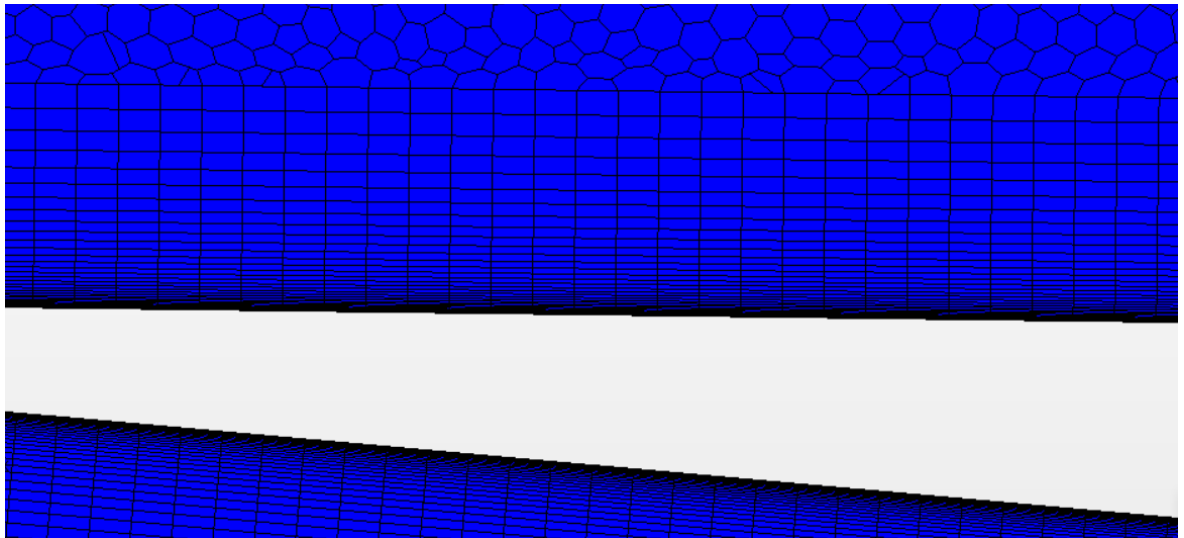


Figura 30: Malla en la capa límit.

### 5.1.1.2. Residuals

Els residuals són una mesura per valorar si una simulació ha convergit en una solució o, per contra, oscil·la entre valor dispars. Representen l'error que es genera entre cada iteració i, sempre tendeixen a valors molt baixos quan la simulació convergeix. Considerar si un residual és suficientment baix com per valorar una simulació com convergida depèn del criteri d'enginyeria establert. En aquestes simulacions s'han pres valors d'ordre màxim de  $10^{-3}$ .

A més, saber quan els residuals assoleixen valors suficientment baixos permet saber el número d'iteracions necessàries per trobar una solució convergida. En el cas d'aquest estudi 2D, 1500 iteracions són suficients.

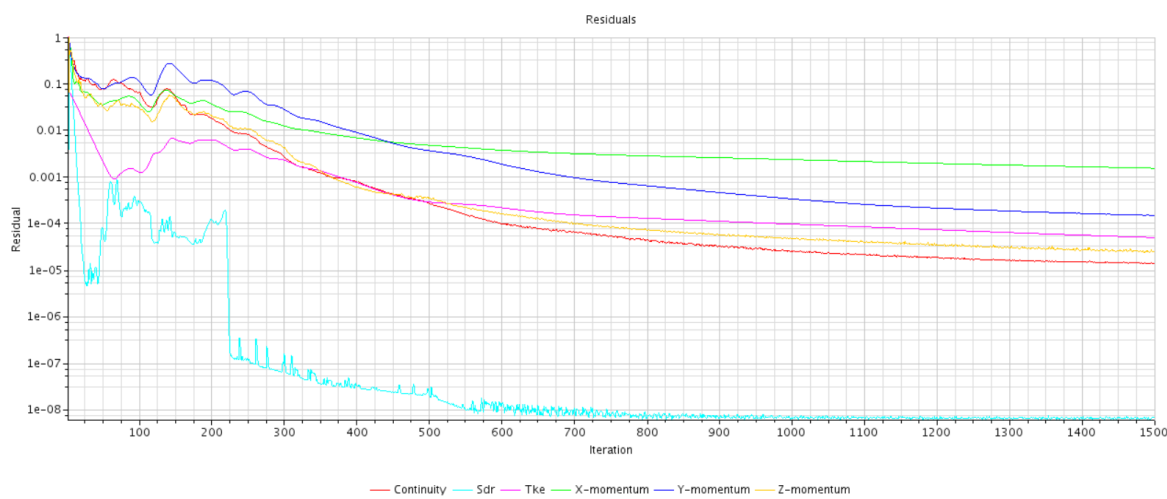


Figura 31: Representació del residuals.

Valors residuals majors d'1 o oscil·lants indiquen que la solució no ha convergit i que, per tant, la simulació és invàlida. Aquests resultats poden venir donats per una baixa qualitat de malla o errors en establir les condicions inicials de la simulació.



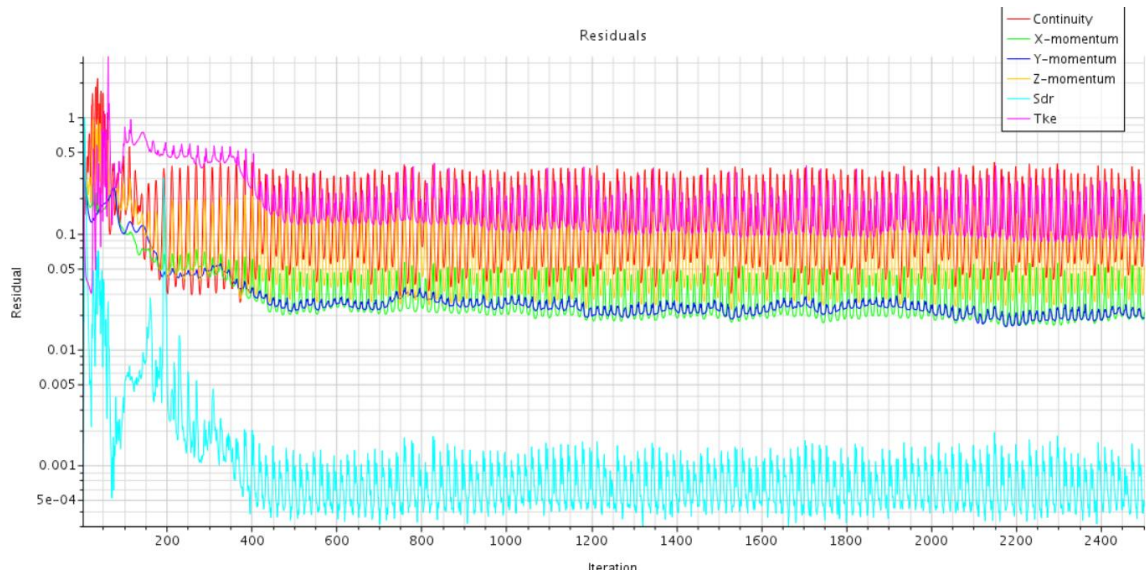


Figura 32: Valors oscil·lants de residuals.

Tot i poder saber si la solució ha convergit, els residuals no asseguren que aquesta sigui la correcta. Pot donar-se el cas de que l'error que es generi entre iteracions sigui molt baix, però el valor al que fan referència sigui incorrecte. Es per això que és necessari també realitzar un estudi de convergència de malla i evitar així resultats erronis.

### 5.1.1.3. Convergència de malla

Per norma general, una malla més refinada, és a dir, amb elements més petits, dona com a resultat una solució més precisa. Tot i així, a mesura que es torna més refinada, el temps de càlcul augmenta. Per trobar una malla que equilibri satisfactòriament l'exactitud i els recursos informàtics es pot realitzar una convergència de malla.

Un estudi de convergència consisteix en el següent procediment:

- Crear una malla amb el menor número d'elements que sigui raonable i analitzi el model.
- Tornar a crear una malla amb una distribució d'elements més densa, analitzar els resultats i comparar-los amb els de la malla anterior
- Repetir el procés incrementant la densitat de la malla i seguir comparant els resultats fins que aquests convergeixin en un valor concret.

Realitzant aquest estudi es pot obtenir aquella malla que amb el menor número d'elements, i per tant amb el temps de càlcul menor, proporcioni un resultat suficientment precís.

Així doncs, s'ha realitzat un estudi de convergència de malla per les simulacions en 2D fent servir un perfil de fons pla bàsic com el que es veu en la Figura 33. En la Figura 34, es mostra el número d'elements de la malla davant de  $Cl/Cd$ .

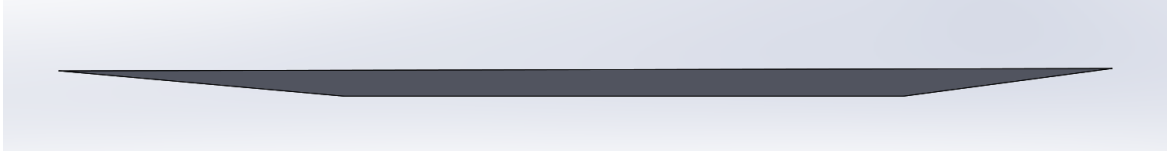


Figura 33: Perfil de fons pla.

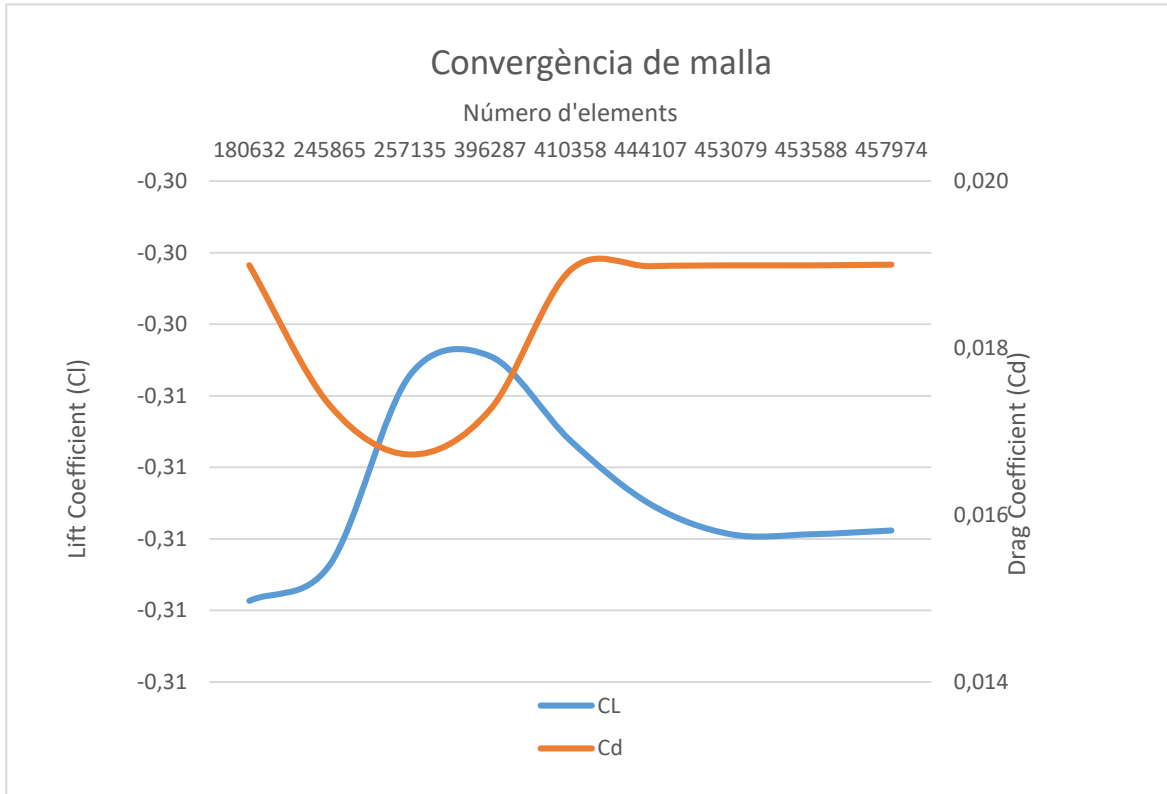


Figura 34: Convergència de malla.

S'ha escollit una malla de 453079 elements, ja que com es pot observar els valors tant de CL com Cd ja convergeixen en aquest punt.

### 5.1.2. Condicions inicials

A continuació s'expressen les condicions inicials per la simulació:

- Tractament de Y+
- Densitat constant:  $1,225 \text{ kg/m}^3$
- Turbulència: K-Omega
- Reynolds-Averaged Navier Stokes
- Segregated flow
- SST K-Omega
- Estacionari
- Turbulent
- Velocitat d'entrada:  $12,5 \text{ m/s}$
- Pressió de sortida:  $0,0 \text{ Pa}$
- N° d'iteracions: 1500

Cal especificar que la velocitat d'entrada és  $12,5 \text{ m/s}$ , ja que es considera la velocitat mitjana en circuit de Formula Student.

## 5.2. Dimensionament de l'angle del difusor

Segons l'estudi que va realitzar Joseph Katz (*Race car aerodynamics, 1947*) sobre angles de difusor en un vehicle de passatgers comú, la reducció de la sustentació era molt marcada entre els angles entre  $0^\circ$  i  $4^\circ$ , i es convertien en valors de carga aerodinàmica en angles majors de  $4^\circ$ , obtenint beneficis fins a angles de  $11^\circ$ . Per aquest estudi s'han simulat angles de difusor de  $4^\circ$  a  $15^\circ$ , amb una longitud fixa.

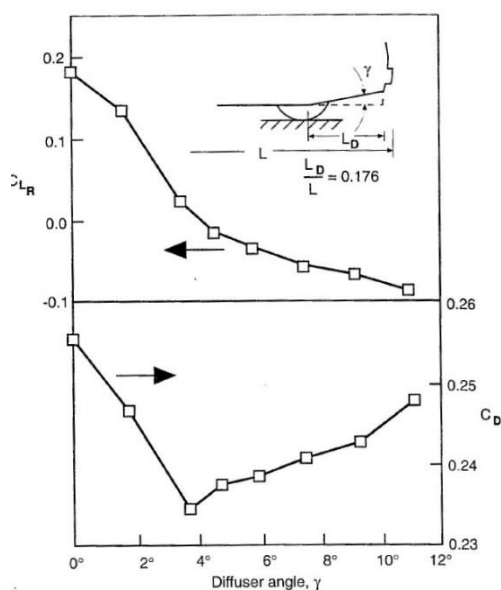


Figura 35: Influència de l'angle del difusor, segons Joseph Katz (*Race car Aerodynamics*).

En la Taula 10 de l'Annex A1 s'han recopilat tots els resultats d'aquestes simulacions. Es pot observar que per un angle de  $7,5^\circ$  s'han donat els millors resultats en termes de  $C_L$  (-0,76).

## 5.3. Dimensionament de la longitud del difusor

Una vegada establert l'angle del difusor, es procedeix a estudiar la longitud d'aquest. S'ha de tenir present el punt T7.3 de la normativa esmentat en l'apartat 1.3, on explica les limitacions de dimensionament dels elements aerodinàmics. En aquest apartat s'han simulat longituds de 300mm fins a 670mm, que és el màxim que la normativa permet.

Un dels aspectes a considerar és que com més llarg és un difusor major serà la seva massa i majors problemes en termes de flexió es poden trobar. S'ha de tenir present que el difusor, en el cas de Formula Student, es troba fora del cos del vehicle i per tant, els punts de suport són limitats. Molt sovint, s'ha de fer ús de tensors en forma de cable d'acer o barra de fibra de carboni

En aquest estudi, com es pot observar en la Taula 11 de l'Annex A1, per majors longituds majors valors de  $C_L$ , tot i que es veu com a mesura que aquesta augmenta s'observen menors increments. D'aquesta

manera, tot i saber que per 670 mm s'obté el major CI, s'ha decidit establir una longitud inferior, 550 mm concretament, per intentar així evitar problemes de flexió i increment de massa. Es busca ara doncs la curvatura òptima per optimitzar el valor de CI obtingut (-0,78), mantenint la longitud.

## 5.4. Dimensionament de la curvatura del difusor

Un perfil corbat de difusor pot donar peu a una menor separació de flux i, per tant, a un augment de *downforce* obtinguda. Aquest estudi consisteix en un assaig prova-error, on s'han realitzat més de 20 iteracions, simulant diferents longituds d'arc i perfils corbats. En la Taula 12 de l'Annex A1, es veuen representats els resultats de cada un de les simulacions realitzades. Per la curvatura obtinguda s'ha vist una augment del 75% en el CI (-1,38)

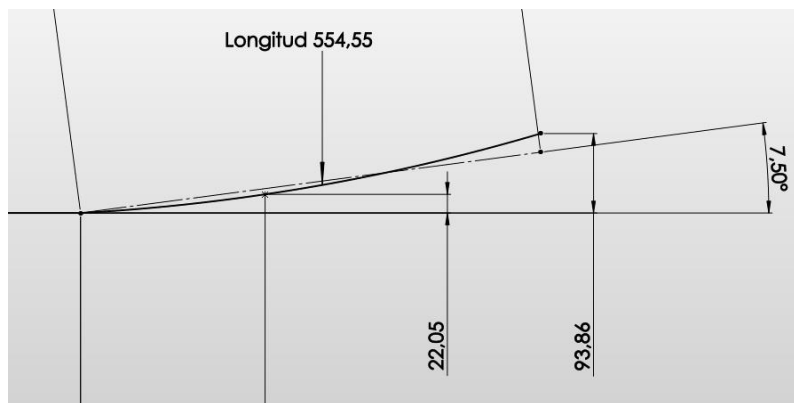


Figura 36: Croquis de la curvatura del difusor.

Després de realitzar l'estudi de dimensionament 2D del fons pla, s'ha pogut extreure una primera iteració del seu perfil a partir del qual es dissenyarà la peça en la seva totalitat. En aquest punt del treball es pot concloure que el fons pla presentarà les següents dimensions:

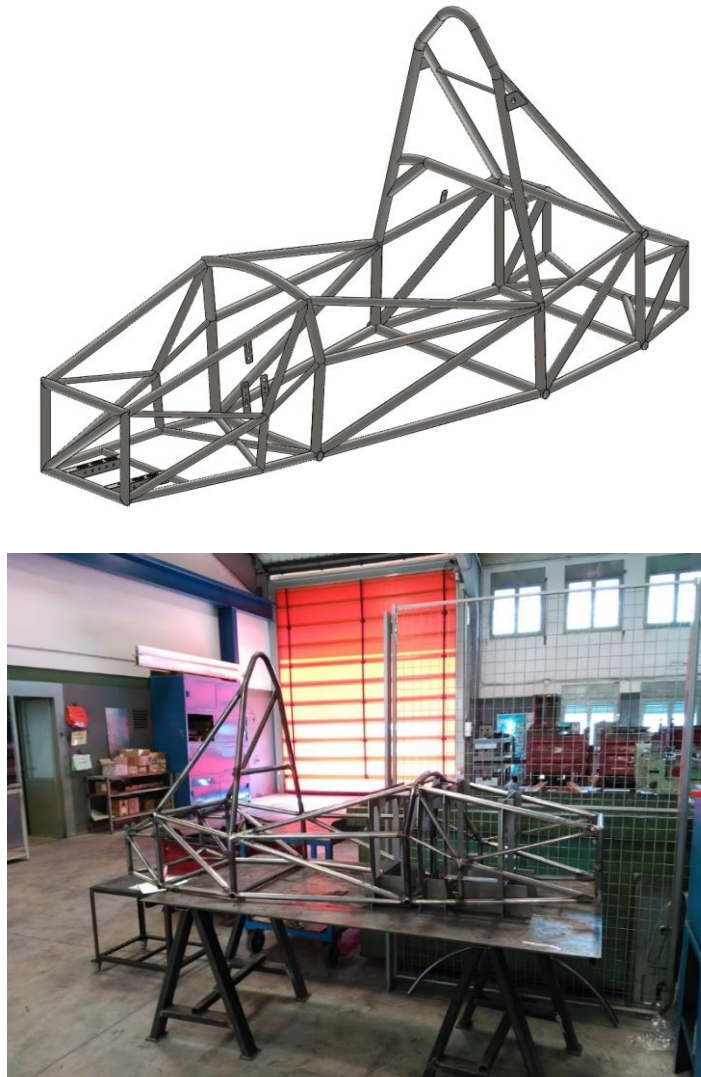
- Longitud d'inlet: 750 mm
- Angle entre inlet i throat: 175°
- Longitud throat: 1300 mm
- Angle de difusor: 7,5°
- Longitud de difusor: 550 mm
- Longitud d'arc: 554,55 mm
- Altura respecte el terra: 45 mm

## 6. Disseny 3D del fons pla

Una vegada dimensionat el perfil del fons pla, es pot passar al disseny real en 3D. Pel disseny en tres dimensions s'han de tenir present aspectes com els punts de suport amb el xassís, interferència amb altres elements del conjunt i, per suposat, diverses consideracions aerodinàmiques.

### 6.1. Acoblament amb el xassís

El disseny en 3D ve determinat, en part, per la geometria del xassís a la que va acoblat. Es tracta d'un xassís tubular d'acer d'alta resistència. En la Figura 37 es pot observar el xassís al qual s'acobra el fons pla objecte d'aquest projecte.



*Figura 37: A dalt CAD del xassís, a baix fotografia real.*

Com s'ha explicat abans, l'*inlet* i *throat* s'ajusten al xassís, però no només en el seu perfil sinó que faran la funció de tapa de la zona inferior del vehicle.



Figura 38: Dimensions generals del fons pla.

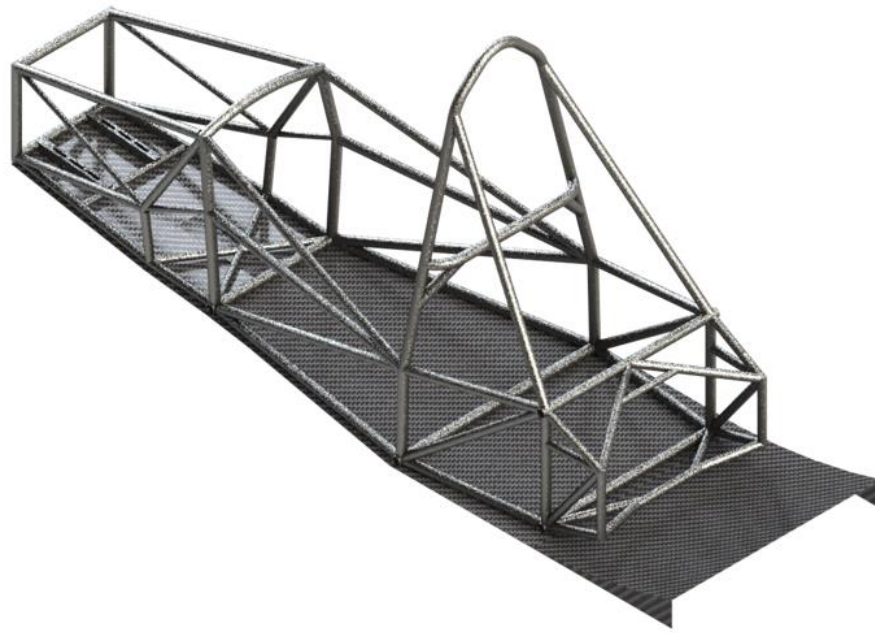


Figura 39: Primera iteració d'acoblament al xassís.

#### 6.1.1. Suports

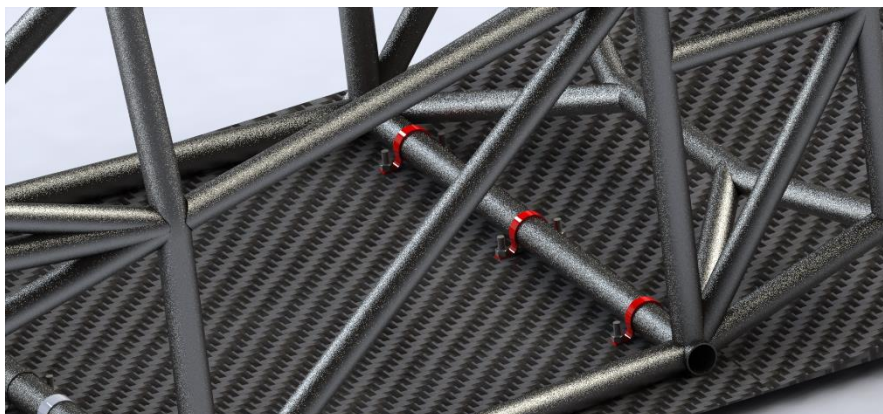
Els punts de suports són de vital importància en tot acoblament de peces. En aquest projecte, els suports cobren una gran rellevància per la poca rigidesa que presenta el fons pla. Com s'explica a l'apartat 7.2, el fons pla és dotat d'un número reduït de capes de fibra de carboni, la qual cosa afectarà a la seva rigidesa i capacitat de flexió. Són els suports els que s'encarreguen de fixar adequadament aquesta peça i evitar que flecti.

La primera alternativa que s'ha valorat és la de fer servir abraçadores d'alumini concèntriques a les barres de xassís i fixades amb cargols i femelles. Es tracta d'una opció que suposa un pes reduït i una fixació adequada. A més, és una alternativa que facilitaria el procés d'acoblament, ja que presenta una gran mobilitat per lo que simplificaria l'elecció dels punts de suport.



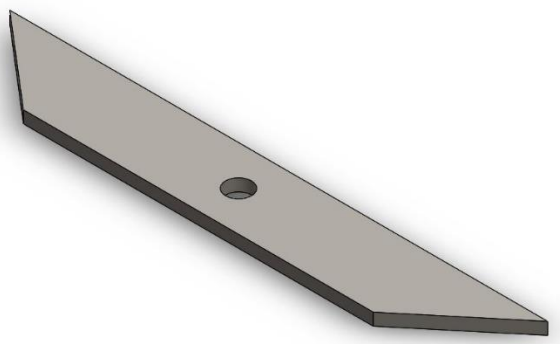
Figura 40: Abraçadora d'alumini.





*Figura 41: Acoblament mitjançant abraçadores.*

La segona alternativa, i alternativa adoptada, és la de fer ús de plaquetes d'acer soldades al xassís. Aquestes plaquetes estarien perforades i farien servir cargols i femelles com a mètode de fixació. S'ha adoptat aquesta opció envers les abraçadores, en primer lloc, per la precisió que es pot guanyar en el procés d'acoblament. En tenir els punts de suports ja fixats, és més senzill controlar el seu posicionament i mantenir la peça equilibrada. Per altra banda, sabent que les abraçadores suposen dos punts de suport cadascuna, l'adequada col·locació de les plaquetes pot reduir aquests punts i, per tant, reduir el número de cargols utilitzats. Finalment, s'ha de tenir present que les abraçadores d'alumini són de baix espessor per lo que són susceptibles a deformacions. Un manteniment inadequat d'aquestes peces pot suposar el seu deteriorament. Les plaquetes, en canvi, no presenten cap tipus de problema en aquest sentit, ja que són de gran rigidesa.



*Figura 42: Plaqueta d'acer.*



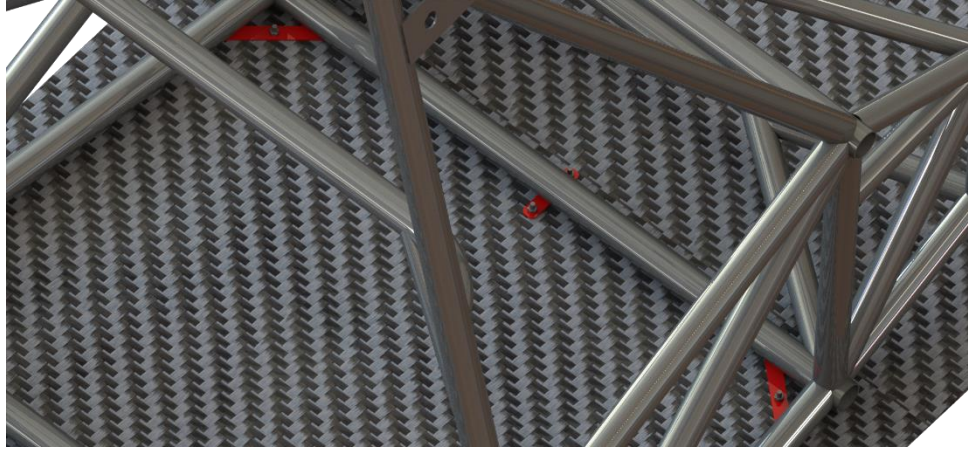


Figura 43: Acoblament mitjançant plaquetes.

Així doncs, els suports consisteixen en dotze plaques d'acer de 2 mm d'espessor fixades al xassís per mitjà de soldadura. Aquestes plaques van ser tallades mitjançant tall làser, ja que proporciona una gran precisió i petites toleràncies. El dimensionament de les plaquetes de suport ve determinat, en part, pel punt T9.1.5 de la normativa que s'explica a l'apartat 1.3 d'aquest projecte.

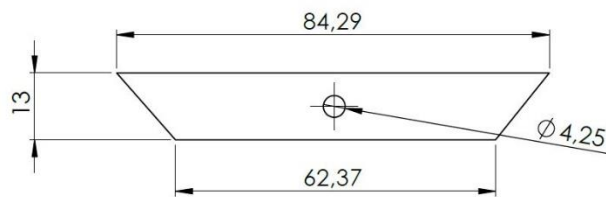


Figura 44: Dimensionament de la placa.

Els punts de suports s'han situat a diverses regions del xassís, de manera que el fons pla quedi homogèniament fixat. Primerament, s'han col·locat quatre punts a la part frontal del monoplaça, simètricament dos a dos. Per fixar la central o *throat* del fons pla, ja que es tracta de la part més extensa, s'han establert sis punts en la perifèria de xassís i quatre a les barres centrals. En la Figura 44, es veu el posicionament de les plaques.

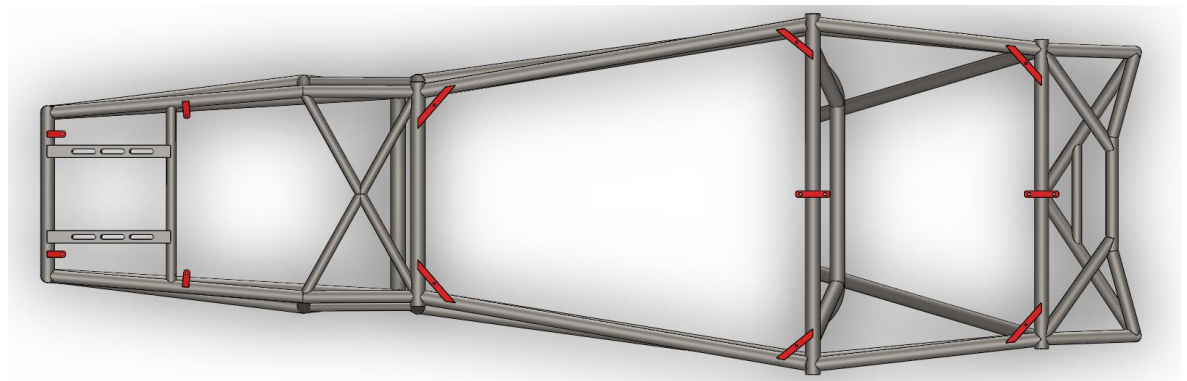


Figura 45: Posició dels suports.

Per realitzar la soldadura no s'ha precisat de plànol ja que, pel fet que els forats del fons pla es fan a posteriori, els suports es posicionen simplement procurant una correcta simetria.



*Figura 46: Soldadura de suport lateral.*



*Figura 47: Soldadura de suport central.*

Per fixar el fons pla als suports es fan servir cargols M4 DIN 933 de 16 mm de longitud, volanderes a banda i banda, i rosques autoblocants DIN 982 . De nou, el mètode de fixació ve determinat en el punt *T9 Fasteners* de la normativa.



*Figura 48: Conjunt suport-fons pla.*

#### **6.1.1.1. Tensors**

Com s'explica en l'apartat 7.2, pel compliment del punt T7.5 de la normativa, esmentat en l'apartat 1.3 d'aquest projecte, és necessària la incorporació d'algun tipus de suport per subjectar la part final del difusor que es troba en voladís. Així doncs, es plantegen dues opcions.

En primer lloc, s'estudia la implementació d'un sistema de barres de fibra de carboni fixades al xassís i acoblades a la part posterior del difusor. Es tracta d'una solució molt habitual en la Formula Student, com a mesura per subjectar elements aerodinàmics. Les barres de fibra suposen una solució de baix pes i donen al difusor una subjecció òptima. A més, es tracta d'un sistema que bloqueja el moviment tant en direcció cap a baix com cap a dalt.



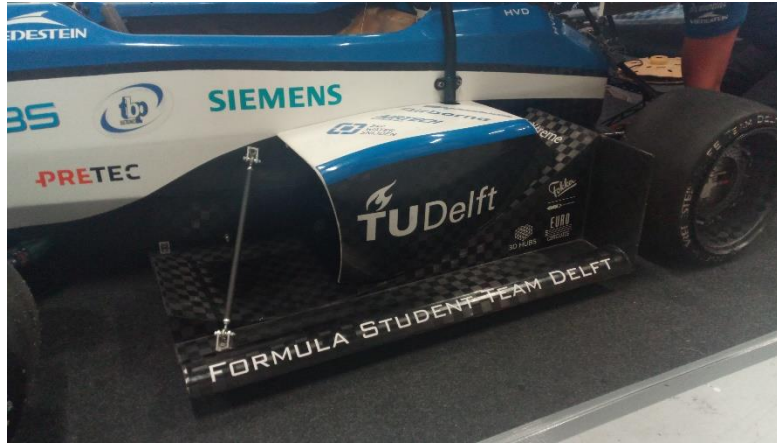


Figura 49: Barra de fibra en un lateral d'un Formula Student.

Per altra banda, s'ha plantejat implementar un sistema de tensors en forma de cable d'acer que subjectarien la peça pels mateixos punts. Tot i que les barres de fibra són una solució vàlida, el cable d'acer presenta més avantatges. Es tracta d'una mesura molt més econòmica, fàcil d'acoblar i lleugera, ja que en el cas de les barres, no només s'ha de tenir present el seu propi pes, sinó que se li ha de sumar els corresponents suports que necessitarien. Pel que fa als tensors de cable d'acer, es poden reaprofitar suports que es fan servir per altres peces per acoblar-se al xassís i es poden realitzar forats a la zona final del difusor per fer passar el cable. Així doncs, els tensors de cable d'acer són els utilitzats en aquest projecte.

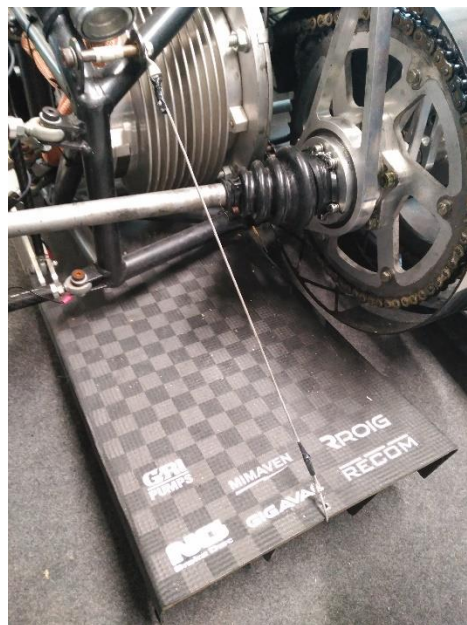


Figura 50: Tensors de cable d'acer.

### 6.1.2. Divisió central

En la normativa de Formula Student apareixen punts que no estan relacionats amb aspectes del vehicle en si. Un clar exemple és el de la *Quick Jack*, que es resumeix en el punt T12.2.1 de la normativa en l'apartat 1.3. Consisteix en un dispositiu que ha de ser capaç d'aixecar les rodes motrius, en aquest cas les posteriors, un mínim de 100 mm respecte el terra. Una de les solucions més comuns és la de soldar un parell de suports a la part posterior del xassís i fer passar una tub d'alumini entre els dos que serveixi com a *Jacking point*, és a dir, punt d'on s'agafaria la *Quick Jack*. En la Figura 51 apareix un exemple real d'aquesta aplicació.



Figura 51: Exemple de Quick Jack.

En el cas objecte d'aquest projecte, no s'ha optat per aquesta solució, ja que el xassís en qüestió presenta una geometria complexa en la part posterior i a més, es obstaculitzat pel sistema de transmissió que hi sobresurt. En la Figura 52, apareix el CAD de la zona posterior del xassís i la transmissió. Els suports anteriorment esmentats haurien de ser de relativa extensió i s'haurien de soldar en orientacions complicades. Tot això i la gran càrrega de pes que hauria de suportar, aproximadament 180 kg, fan pensar que aquests suports suposarien un increment de pes al vehicle que podria evitar-se.

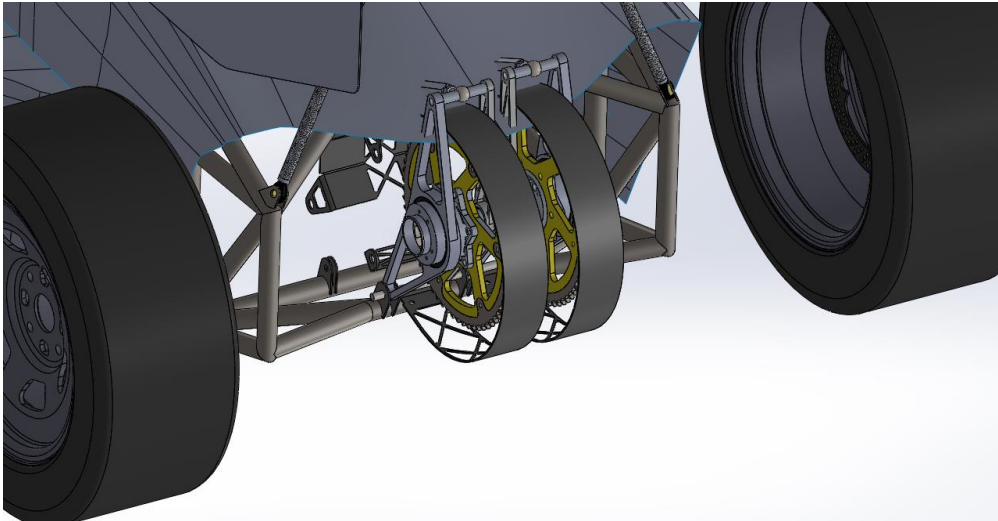


Figura 52: Conjunt xassís-transmissió.

Una alternativa a la soldadura de suports podria ser la d'acoblar la barra de *Jacking Point* entre les parets internes del difusor. En la Figura 53 apareix un exemple d'aquesta tècnica. Tot i estalviar en problemes de soldadura apareix la incògnita de com fixar-ho a la peça de fibra. En haver d'aguantar grans esforços, les parets de suport haurien d'estar reforçades en gran mesura amb capes de fibra, nucli de foam o fins i tot nucli de *honeycomb*. El reforç de l'estructura del difusor suposaria un increment del pes de la peça que, com s'ha explicat abans, es vol evitar. A més, s'han de tenir present les possibles conseqüències que pot tenir aquesta decisió en el comportament aerodinàmic.



Figura 53: Jacking Point entre parets de difusor.



Per aquest motiu, la decisió que s'ha pres és la fer servir una barra de xassís com a *Jacking point*, d'aquesta manera s'evita incrementar el pes del cotxe de manera innecessària amb pesats suports d'acer o estructura de fibra reforçada. A més, les barres que conformen el xassís són tubs d'acer d'alta rigidesa que no presenten cap problema per aguantar grans forces. Per accedir amb la *Quick Jack* a la barra escollida s'ha requerit tallar la part central del difusor 150 mm com es mostra en la Figura 54. Segons les simulacions realitzades en l'apartat 6.4.1, les conseqüències que té aquesta decisió en termes de *downforce* són mínimes.

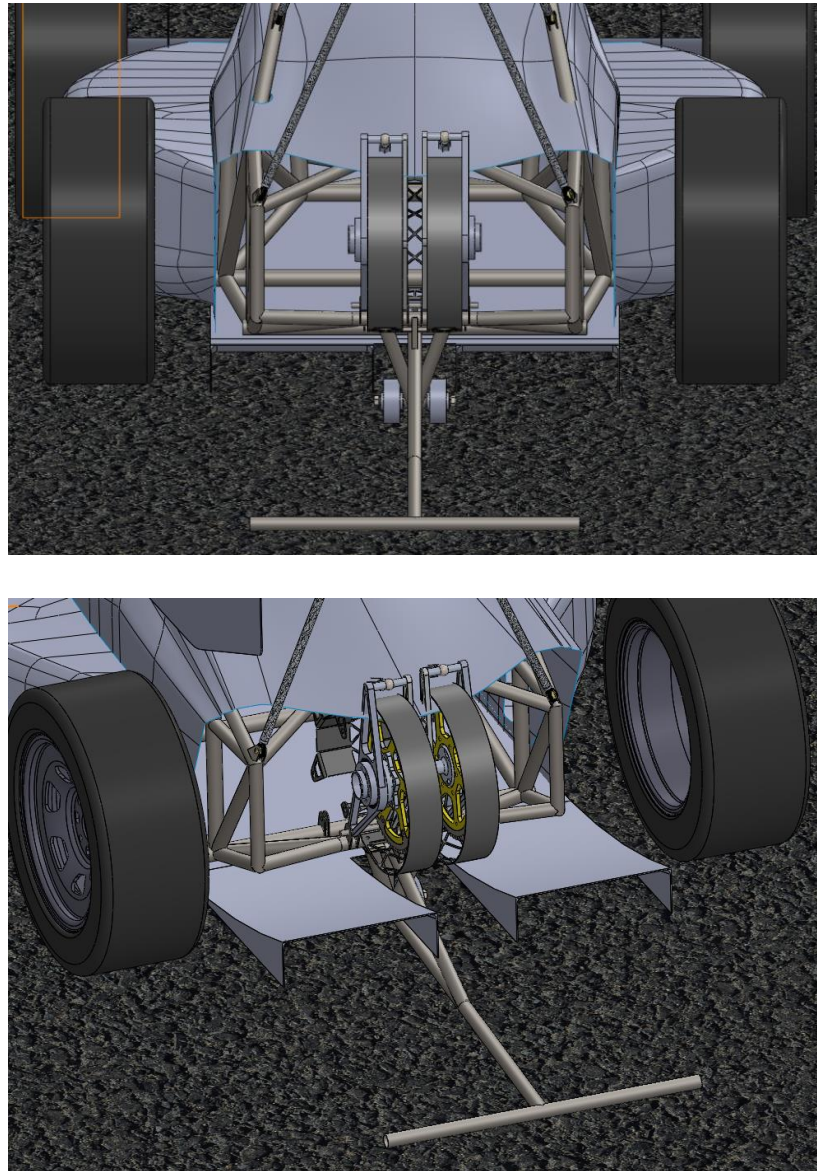


Figura 54: Vehicle en posició de Quick Jack. Divisió del difusor.

### 6.1.3. Zona del sensor

Una de les interferències més clares amb el fons pla és la del sensor de direcció, col·locat al final de la canya de direcció i que sobresurt de xassís per la part inferior. En la Figura 55 apareix el CAD del sensor i el xassís.



*Figura 55: Sensor de direcció sobresortint del xassís.*

Per solucionar aquesta interferència s'ha optat per crear una zona allargada i corba en la part de l'*inlet* del fons pla. D'aquesta manera s'ha evitat el contacte amb les dues peces i afectar en la mínima mesura possible al flux d'aire que hi circula per sota.



*Figura 56: Zona del sensor.*

## 6.2. Simulació CFD 3D

Per determinar tant la posició com les dimensions reals de qualsevol element aerodinàmic, és vital realitzar un correcte estudi del comportament de l'aire a través d'aquests. Els estudis CFD en 3D reben una gran importància ja que permeten valorar la interacció entre tots els elements del conjunt i obtenir



la forma aerodinàmica òptima del vehicle. Per la realització de les simulacions en 3D també s'ha fet ús del software Star CCM+.

De la mateixa manera que en les simulacions 2D, aquestes també estan formades per una geometria i un volum de control. En aquest cas, la geometria guanya en complexitat, ja que es representa el model del vehicle en tres dimensions. Tot i així, per estalviar temps de mallat i càlcul, és necessari realitzar certes simplificacions, així com només simular la meitat del vehicle. Pel fet de que només s'estudia l'aire frontal es considera que el comportament d'aquest és simètric. A més, elements com les suspensions o els suports de l'aleró posterior són omesos.



*Figura 57: Dimensions del model.*

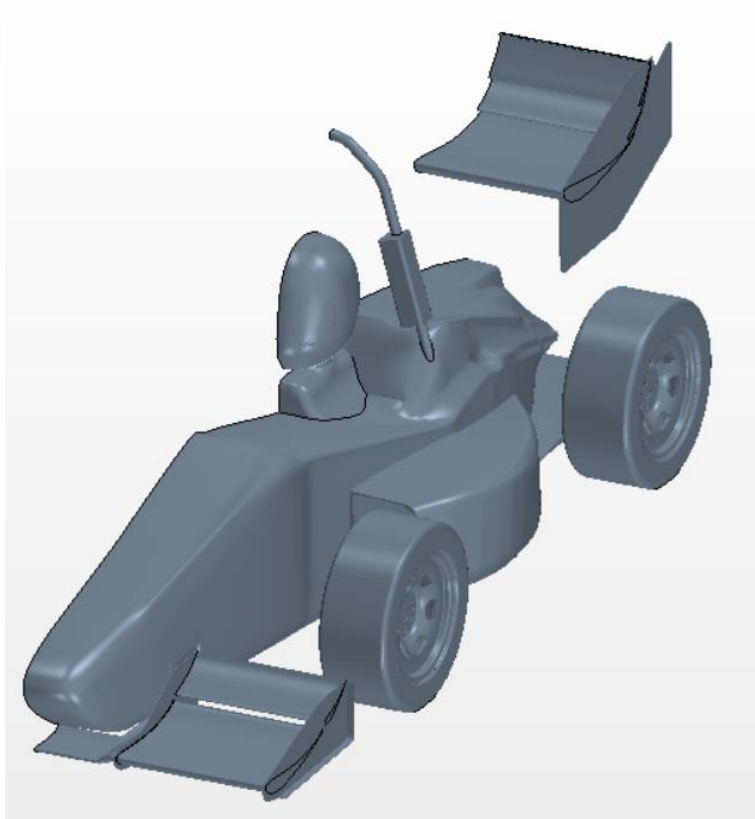


Figura 58: Geometria d'estudi.

Pel que representa al volum de control, com en el cas de les simulacions en dues dimensions, aquest ha d'abastar tota la geometria i deixar cert marge per poder estudiar correctament el comportament de l'aire. De la mateixa manera, les dimensions del volum de control venen donades en funció de la longitud del model.

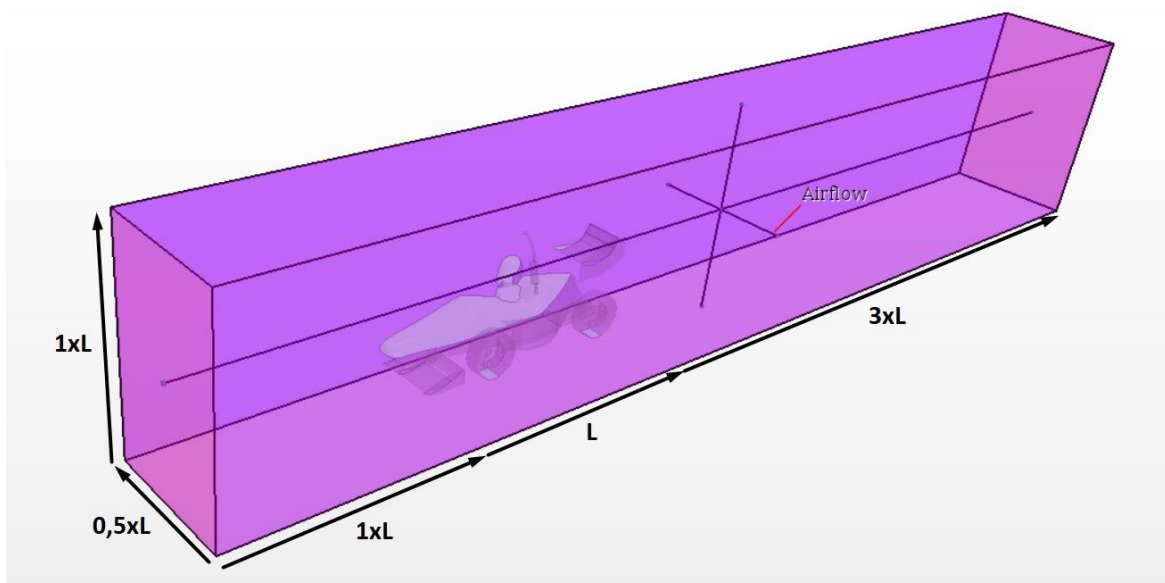
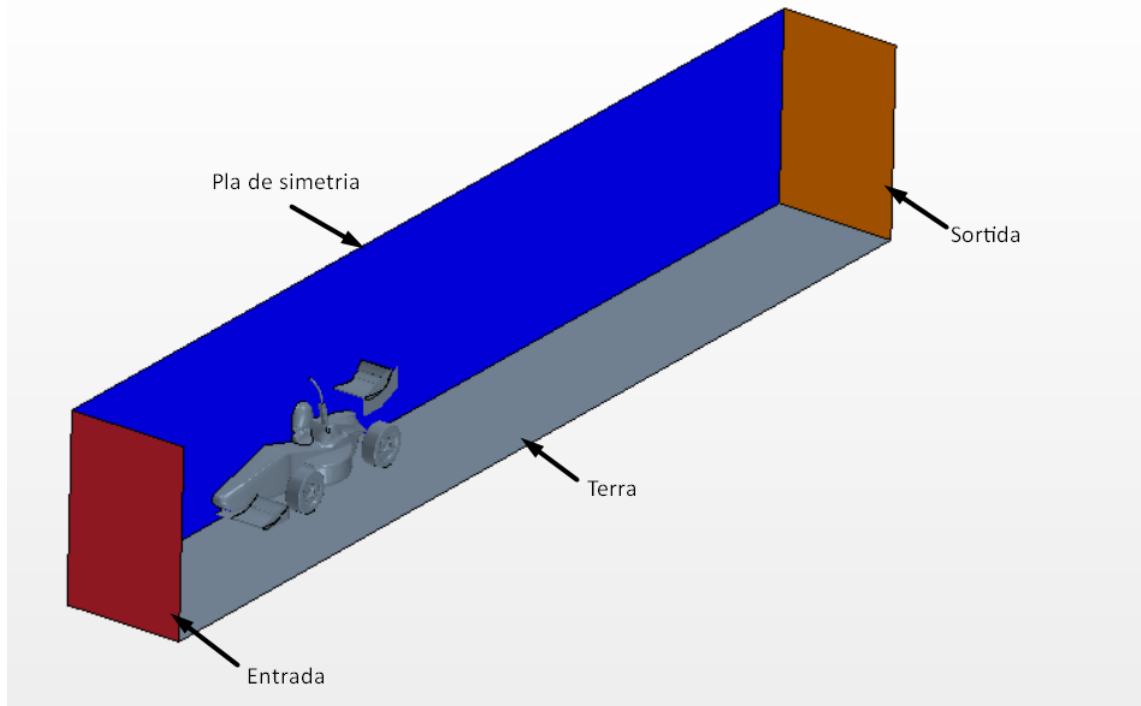


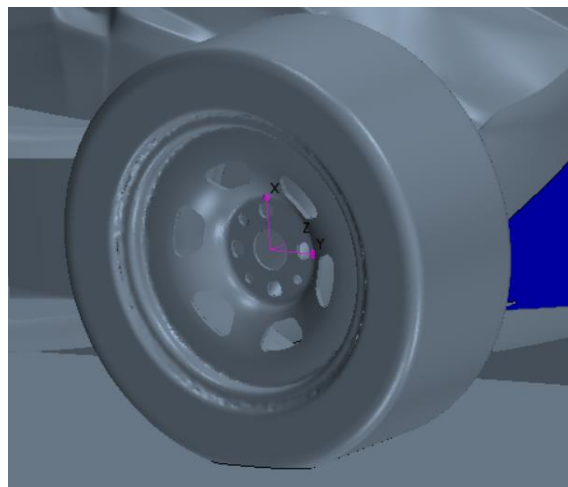
Figura 59: Dimensions del volum de control 3D.

Cal especificar també, que cada paret que forma el volum de control representa una certa funció: entrada i sortida d'aire, pla de simetria o terra.



*Figura 60: Volum de control 3D.*

Un dels aspectes que s'han de tenir present quan s'estableix el volum de control és la deformació de les rodes. Delimitar el volum de control a la perifèria de les rodes permet aconseguir aquest efecte i així obtenir simulacions més realistes. A més, s'ha implementat el gir de les rodes mitjançant la creació d'un eix de coordenades en el seu centre.

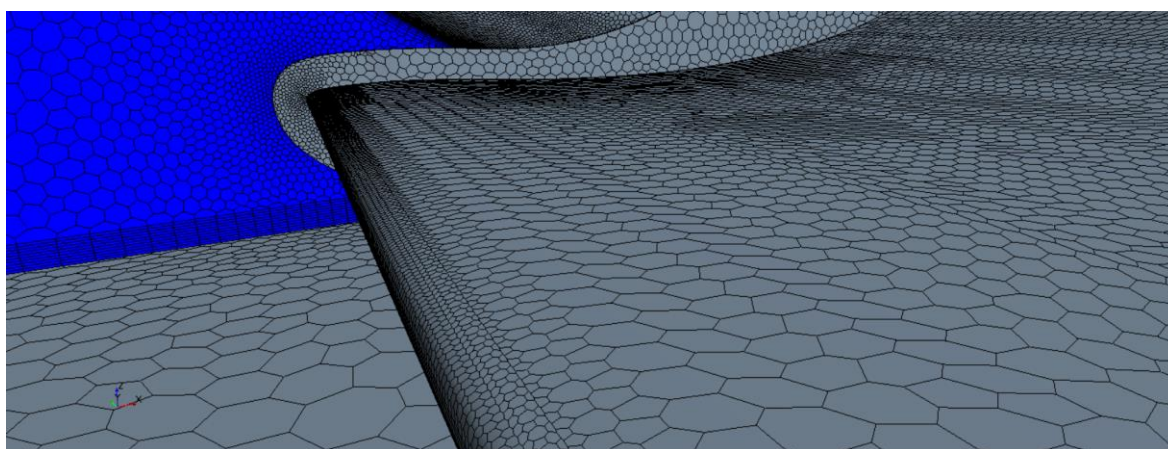


*Figura 61: Eix de rotació de la roda.*

### 6.2.1. Malla de simulació (3D)

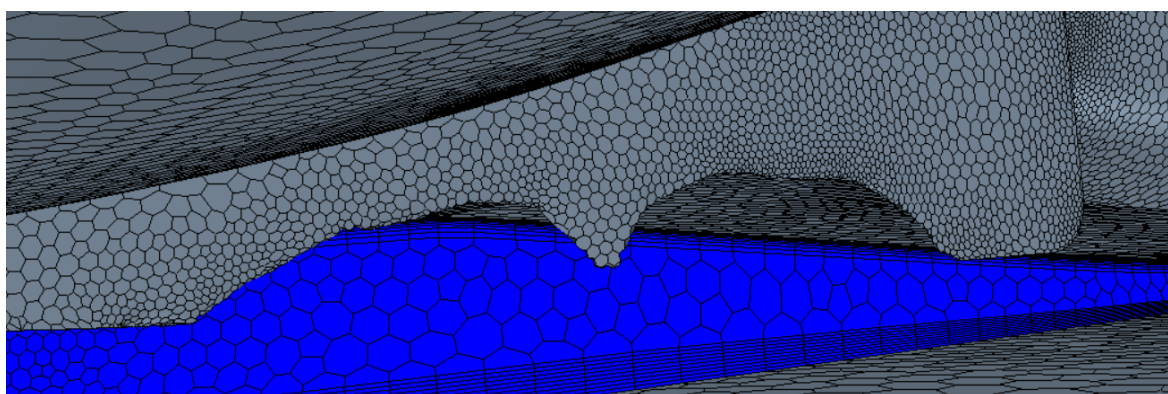
La malla de simulació és, en essència, igual que la de simulacions en dues dimensions, simplement, en aquest cas, els subdominis es generen per tot el volum 3D. Tot i així, factors com la malla superficial o la proximitat entre elements complica el procés.

Com s'ha dit anteriorment, la geometria ara és més complexa, ja que es tracta d'un conjunt de diversos elements de diferents formes i mides. Així doncs, per aconseguir les simulacions més precises possibles, és important que la malla s'adapti a les diferents formes que componen la geometria. És possible regular la mida mínima que poden arribar a assolir les cel·les per cada element, facilitant així que la malla s'ajusti a la seva curvatura.



*Figura 62: Malla superficial.*

Si per contra la malla no està ben definida, poden aparèixer errors que afectin a la definició de la geometria i, per tant, al resultat de la simulació. A la Figura 63, apareix un exemple d'error de malla.



*Figura 63: Error de malla.*

De la mateixa manera que per les simulacions 2D, també s'ha de generar una zona de refinament en les proximitats de la geometria i en la zona del deixant.



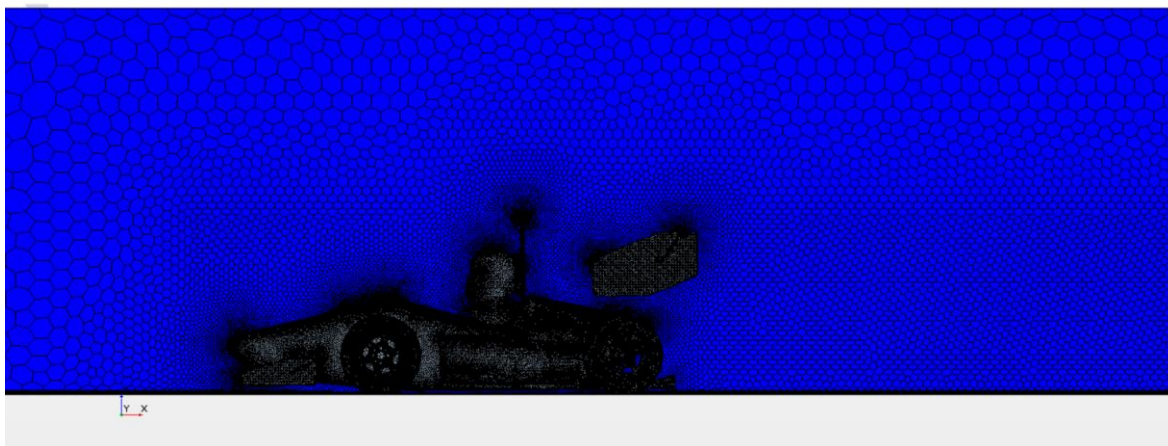


Figura 64: Zona de refinament de la malla.

Pel dimensionament de les cel·les en les zones de capa límit s'ha fet servir de nou el model "Y+5". La distància de la primera cel·la i mida total de la capa límit han sigut determinats per cada element segons la seva longitud de corda. Pel que fa al difusor, s'han fet servir els mateixos valors que els descrits en l'apartat 5.1.1.1.

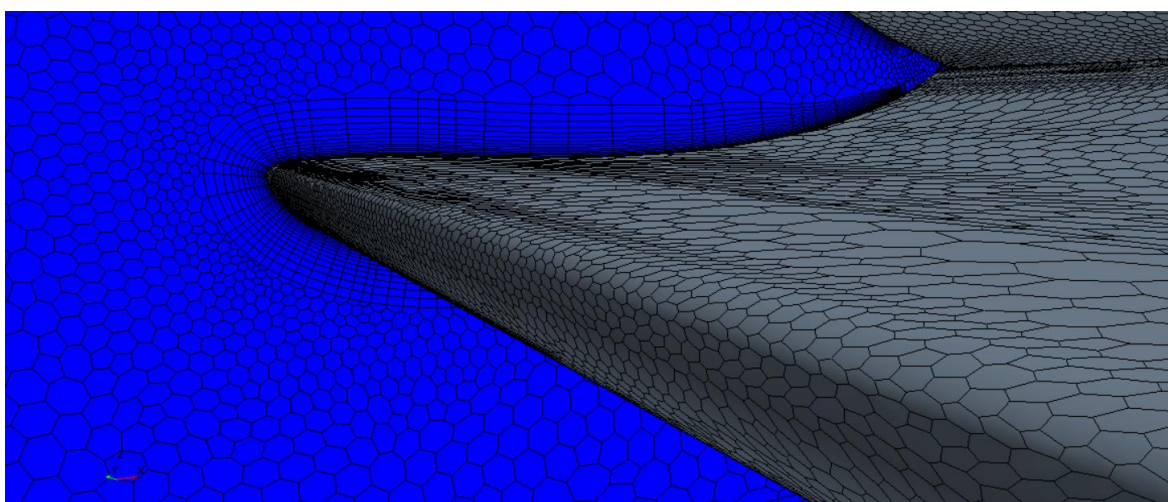


Figura 65: Capa límit.

#### 6.2.1.1. Convergència de malla (3D)

Les simulacions en 3D representen moltes hores de computació, podent arribar a tardar més de 8 hores. Es per això que és important realitzar un estudi de malla amb el qual poder reduir al mínim el temps de càlcul, assegurant la convergència dels resultats.

En aquest projecte s'ha fet servir l'estudi de convergència de malla realitzat per Victor Pérez a *Desarrollo de elementos aerodinámicos del prototipo Formula Student E-tech Racing*, ja que es tracta del mallat del mateix model. En aquest cas, l'estudi pren com a referència l'aleró posterior del monoplaça per així poder estalviar temps computacional. Amb la configuració de malla obtinguda,

s'extrapola a les simulacions completes del vehicle, mantenint la configuració de malla i assegurant la fiabilitat de la mateixa. A la Taula 1, es detallen els resultats obtinguts.

Taula 1: Estudi de convergència de malla (Pérez, V., Desarrollo de elementos aerodinámicos del prototipo Formula Student E-tech Racing)

ESTUDIO DE SENSIBILIDAD					
SIMULACIÓN	Nº ELEMENTOS MALLA	CL	CD	DOWNFORCE (N)	DRAG (N)
ULTRA FINE MESH Y+5	9048308	6,176314	1,672442	60,38246843	16,35055735
MEGA FINE MESH Y+5	4328860	6,29484	1,714493	61,54123278	16,76166714
SUPER FINE MESH Y+5	2437655	6,31811	1,727279	61,76861	16,88663586
FINE MESH Y+5	1081252	6,0809	1,657109	59,44885913	16,20054392
MEDIUM MESH Y+5	785711	6,05072	1,66152	59,16641717	16,24702274
COARSE MESH Y+5	404310	5,9005	1,6333	57,69564102	15,9705602

Segons l'extrapolació realitzada la malla que s'utilitza per les simulacions 3D conté 10043271 elements.

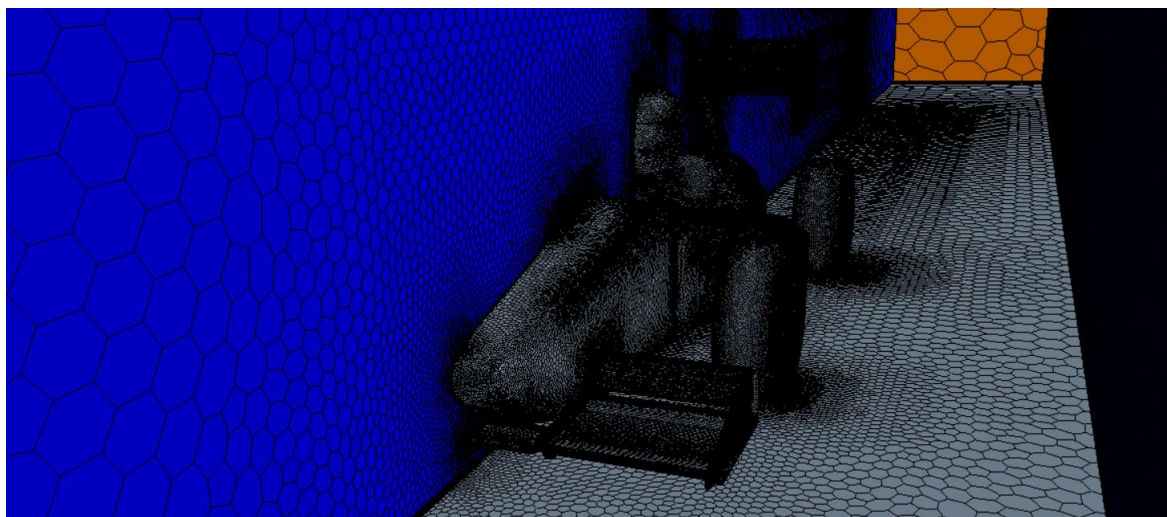


Figura 66: Malla de simulació 3D (1).

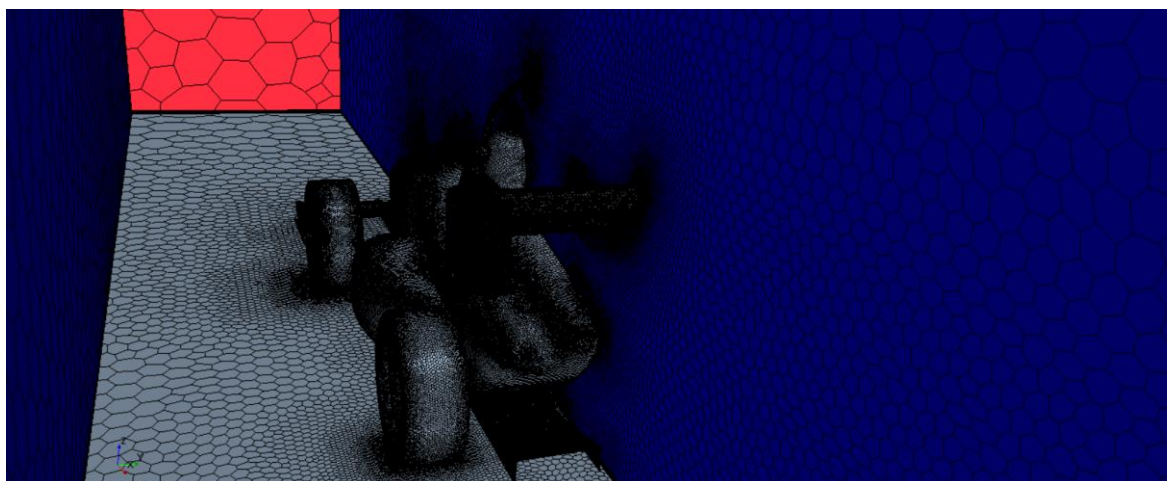


Figura 67: Malla de simulació 3D (2).

### 6.2.2. Condicions inicials (3D)

Les condicions inicials de les simulacions 3D no canvien respecte les de simulacions 2D. De la mateixa manera, la velocitat de simulació és de 12,5 m/s, com a velocitat mitja de circuit. Tot i així, el número d'iteracions augmenta fins a 2500 pel fet que, en ser una geometria més complexa, el residuals tarden més en estabilitzar-se.

## 6.3. Anàlisi del resultat

A continuació s'analitzen els resultats de les simulacions realitzades, així com la solució escollida pel que fa al disseny del difusor. Ja que l'objectiu d'aquestes simulacions és el de torbar aquella configuració d'elements que generi major *downforce*, el conjunt d'aleró davanter, posterior i carrosseria s'ha mantingut constant en la millor configuració aerodinàmica trobada en estudis paral·lels, i així poder estudiar la influència que el difusor té en el sistema. Els resultats més rellevants es veuen reflectits a la Taula 13 de l'Annex A1.

Així doncs, primerament s'ha realitzat una simulació base en la que el difusor no és present. És a partir dels resultats obtinguts en aquesta simulació que es faran totes les comparacions. Aquests resultats es veuen resumits en la següent taula:

*Taula 2: Resultats simulació base.*

Cd	Cl	Ratio (Cl/Cd)	Àrea Frontal (m2)	Downforce (N)	Dragforce (N)
1,12	-1,84	-1,64	0,51	-89,64	54,49



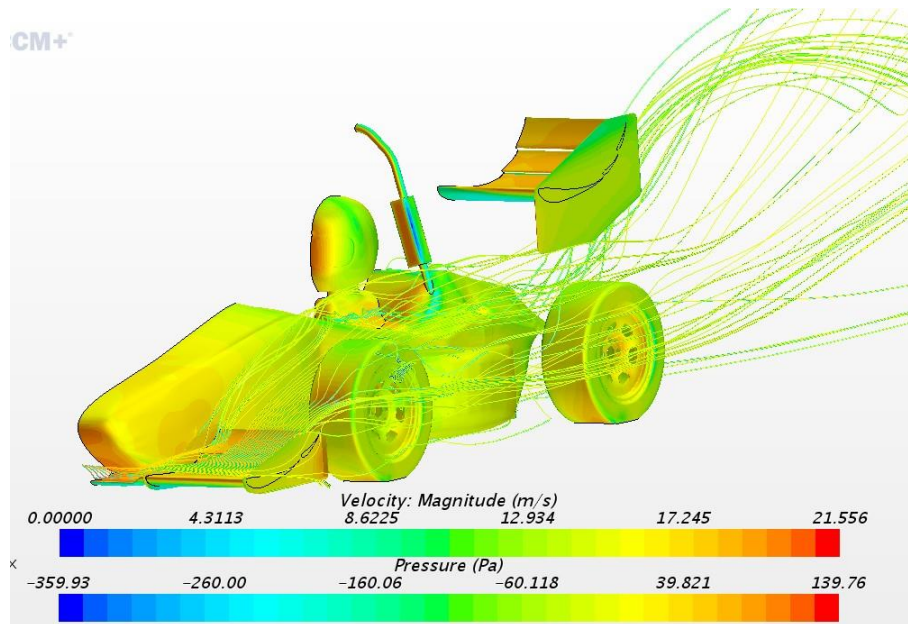


Figura 68: Aire influenciat per l'aleró davanter (Desarrollo de elementos aerodinámicos del prototipo Formula Student E-tech Racing).

Un dels aspectes que s'ha de tenir present en observar aquests resultats és que en aquestes simulacions l'àrea frontal romandrà constant i, per tant, sabent que les condicions també són constants, els valors de *downforce* i *dragforce* només venen influenciats pels coeficients  $C_d$  i  $C_l$ .

El següent pas és el d'incorporar el difusor a la part posterior del vehicle així com s'ha dissenyat en l'apartat 6.1 i avaluar el resultats. En la Taula 3 es comparen els valor obtinguts de  $C_d$  i  $C_l$  amb els anteriorment esmentats. Com es pot observar, els valors dels coeficients no només no es veuen alterats, sinó que disminueixen en certa mesura. Això ens indica que tot i els estudis realitzats en 2D, el difusor no està treballant com hauria.

Taula 3: Comparativa simulació base/ amb difusor.

	$C_d$	$C_l$
Simulació base	1,12	-1,84
Amb difusor	1,07	-1,80



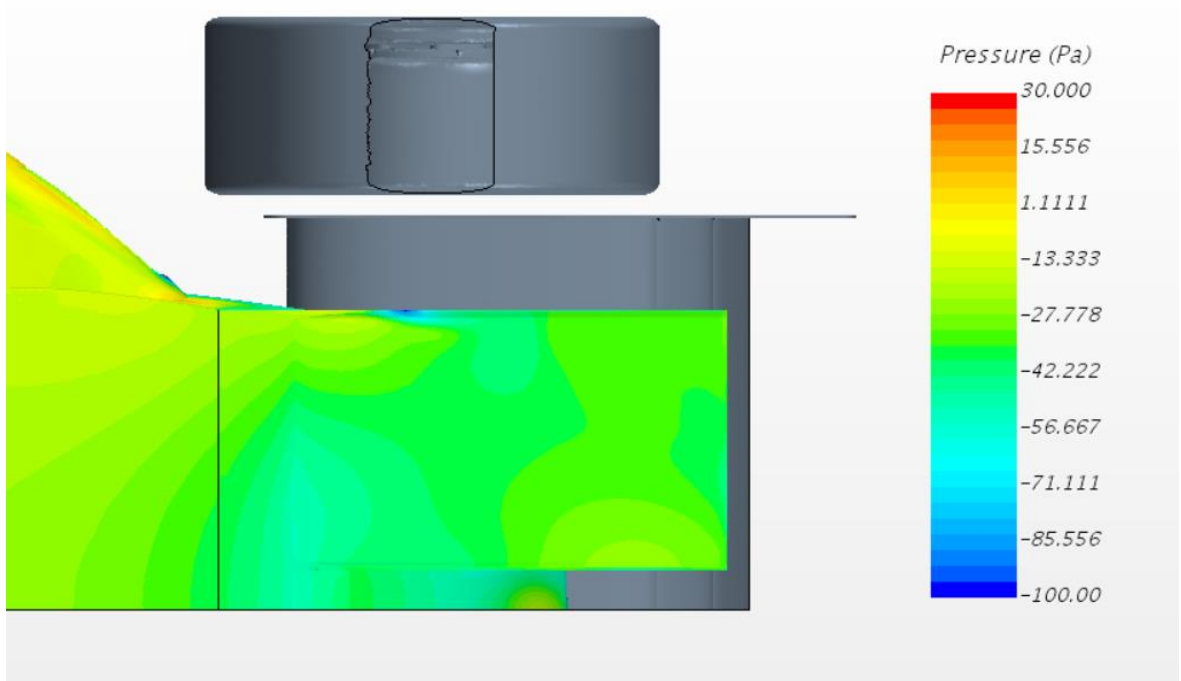


Figura 69: Distribució de pressions en la superfície del difusor.

Com es pot observar a la Figura 69, no s'està generant un correcte gradient de pressions en la zona del difusor. Per contra, es veu que només apareix un pic de pressió negativa en la part interior del començament del difusor i per tant, l'àrea efectiva es veu reduïda. Per comprovar els possibles motius d'aquest fet es genera una escena on es visualitzin les corrents d'aire per sota del vehicle.

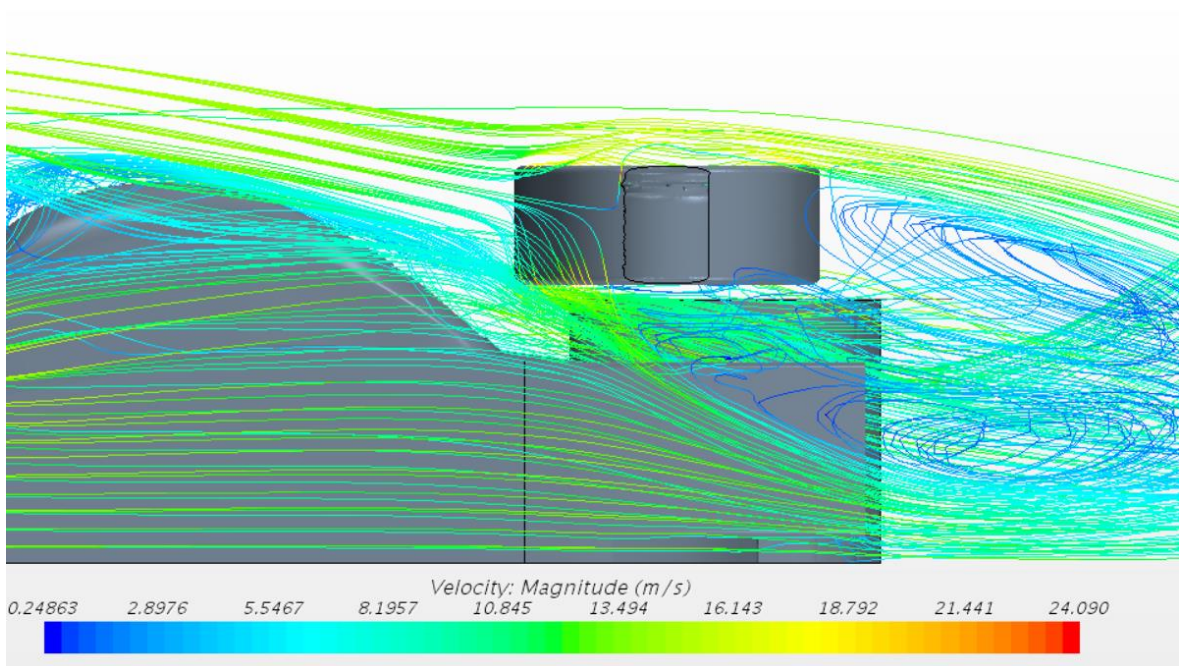
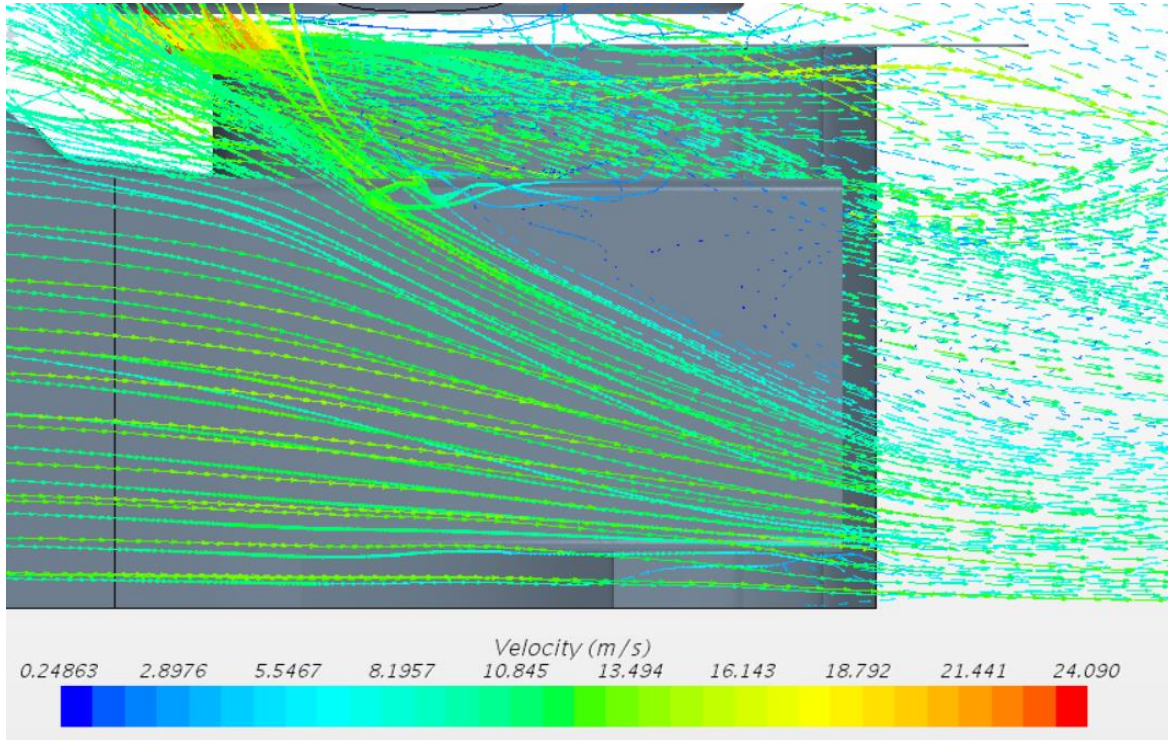


Figura 70: Línies de trajectòria de l'aire sota el fons pla.

Visualitzant les línies de trajectòria de l'aire es pot comprovar que el problema en el difusor prové de la interferència amb l'aire que ve de les rodes. Aquest aire forma una barrera que evita que el flux sota el fons pla sigui retornat al seu estat inicial de manera gradual mitjançant el difusor.



*Figura 71: Vectors de velocitat en la zona del difusor.*

La roda posterior, en trobar-se descoberta, rep una gran quantitat d'aire generant una zona d'alta pressió. Pel gir de les rodes, l'aire es conduit a la zona més baixa on s'acumula per, finalment, escapar pels laterals. És aquesta fuga d'aire que influeix a l'aire que flueix lliurement sota el fons pla.

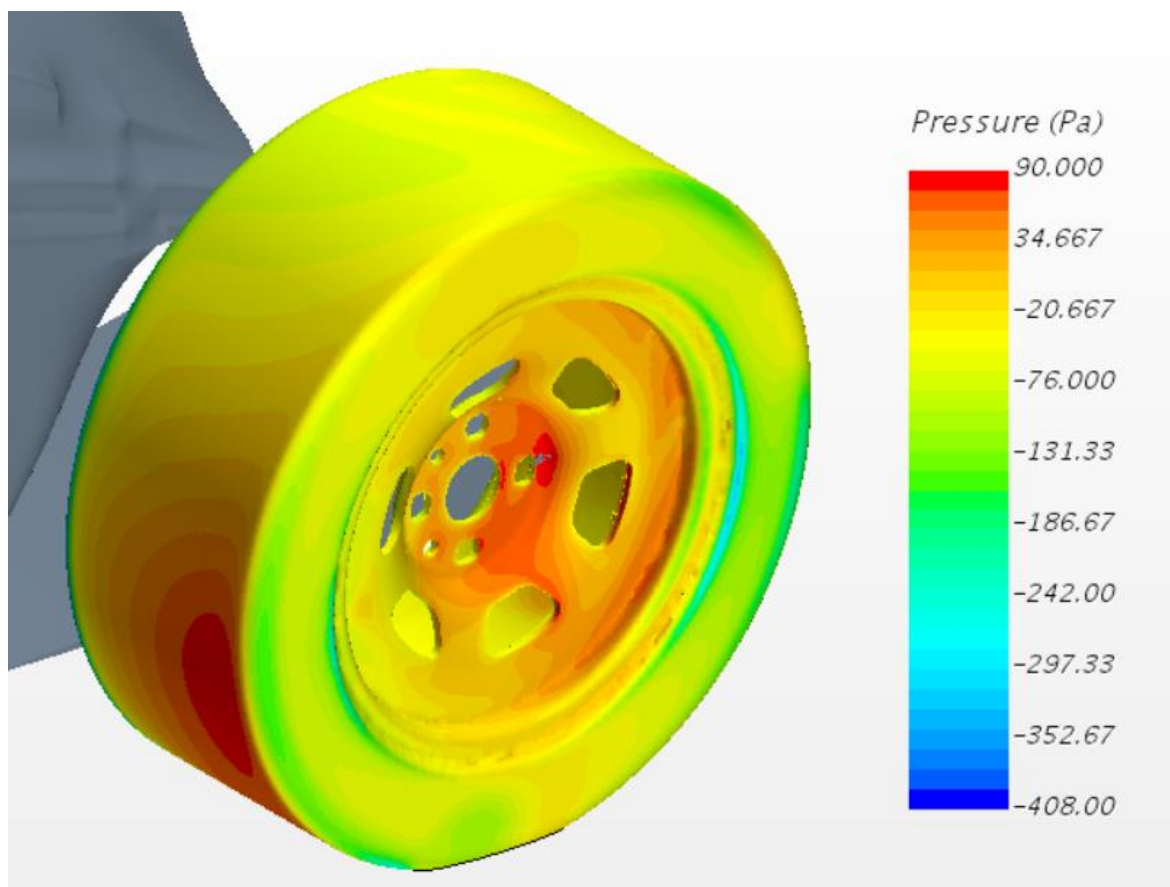


Figura 72: Distribució de pressions en la superfície de la roda posterior.

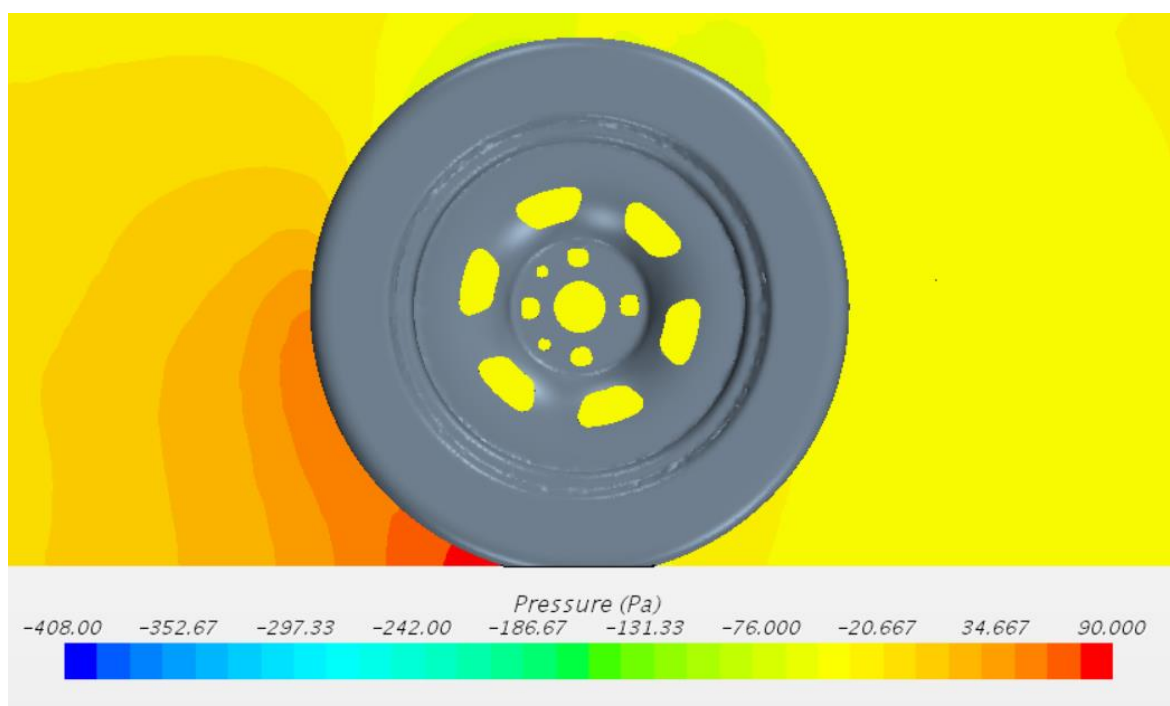


Figura 73: Distribució de pressions en la perifèria de la roda posterior.



Aquesta simulació demostra que les rodes dels vehicles tipus Formula, en els que estan descobertes, influencien en gran mesura en el comportament aerodinàmic del monoplaça, especialment al fons pla. És evident que gestionar l'aire que arriba a les rodes cobra molta importància en aquest sentit i representaria la solució més adequada per millorar el rendiment del difusor, tot i així, per decisions sobre el concepte del vehicle que es realitza a principis de temporada, l'espai entre rodes és reservat al lliure disseny del pontons per refrigeració. Aquesta situació dona peu a que tota mesura presa per resoldre aquest problema no interfereixi amb aquest espai. Així doncs, tenint això present, la solució s'ha de trobar variant la forma del difusor.

### 6.3.1. Aletes

Les aletes o *fins* en anglès, són apèndix aerodinàmics que es col·loquen en el difusor i serveixen per controlar l'aire que passa per ell. Es tracta d'una solució que s'aplica en la majoria de competicions d'automobilisme, com la F1 o DTM.

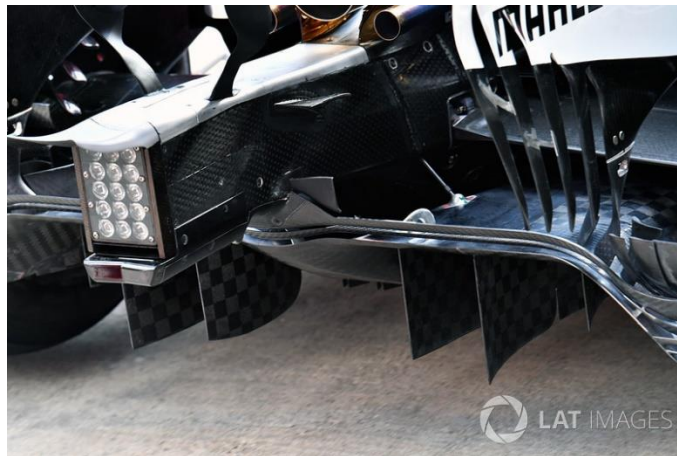


Figura 74: Aletes en un difusor de F1.

El motiu pel qual s'implementen les aletes és per la influència que tenen en l'aire procedent dels laterals. En trobar-se en posició perpendicular al flux, generen un vòrtex en la zona més baixa que fa la funció de barrera entre l'aire lateral procedent de les rodes i l'aire sota el fons pla. Així doncs, si es genera un vòrtex amb suficient energia, pot arribar a aïllar l'aire del difusor i millorar el seu rendiment.

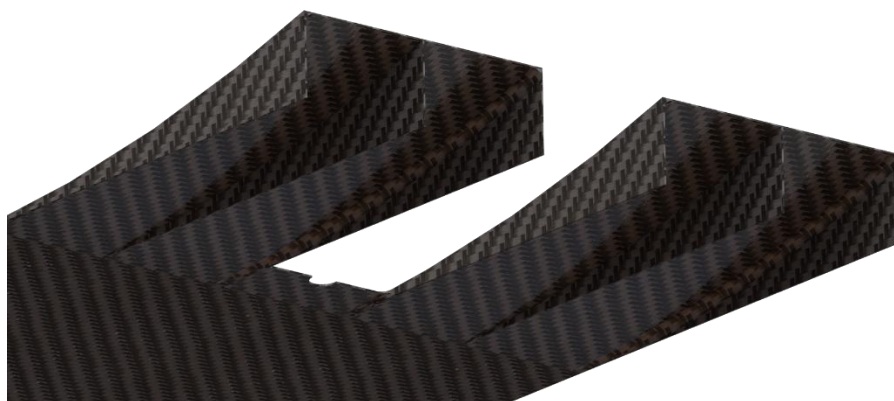


Figura 75: Aletes al difusor.

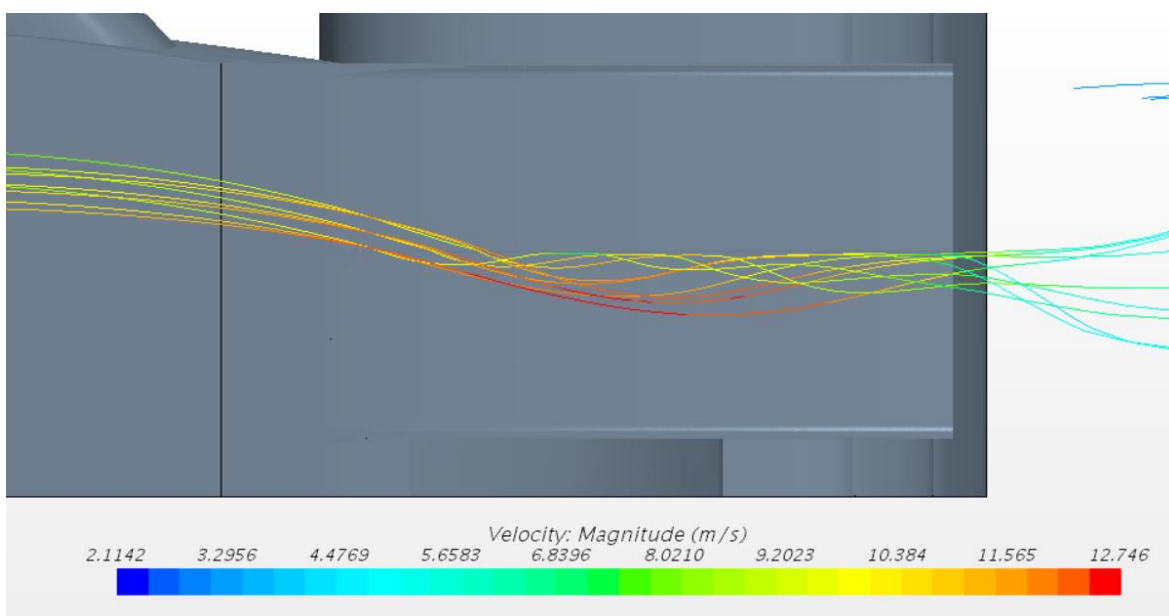


Figura 76: Vòrtex generat per l'aleta del difusor.

El número d'aletes i la seva posició afecta també al comportament del difusor. Un matís que s'ha estudiat és el de crear, en la zona baixa de l'aleta, una pestanya perpendicular per així moure el vòrtex a la part més exterior del difusor. En la Taula 4, es comparen diverses configuracions que s'han simulat.

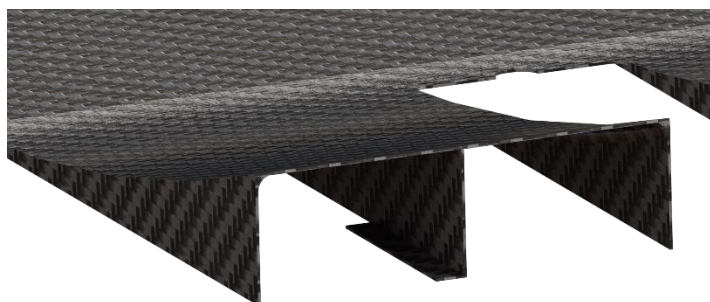


Figura 77: Pestanya a l'aleta del difusor.

Taula 4: Comparativa configuració d'aletes.

	Cd	Cl
1 Aleta posició central AMB pestanya	1,13	-1,87
2 Aletes AMB pestanya	1,11	-1,89
1 Aleta posició central SENSE pestanya	1,10	-1,91
2 Aletes SENSE pestanya	1,12	<b>-1,93</b>
1 Aleta SENSE; 1 Aleta AMB	1,11	-1,85
1 Aletes AMB pestanya pos. 2	1,12	-1,88
2 Aletes SENSE pestanya pos. 2	1,11	-1,92
3 Aletes SENSE pestanya	1,07	-1,84

Es pot observar que fent servir dues aletes sense cap tipus de pestanya s'aconsegueix el màxim valor de Cl. Les aletes estudiades en aquesta configuració es troben equidistants en el difusor i tenen la mateixa longitud. S'ha de tenir present que es tracta d'una simulació de mig cotxe i que per tant, el número d'aletes total és quatre.

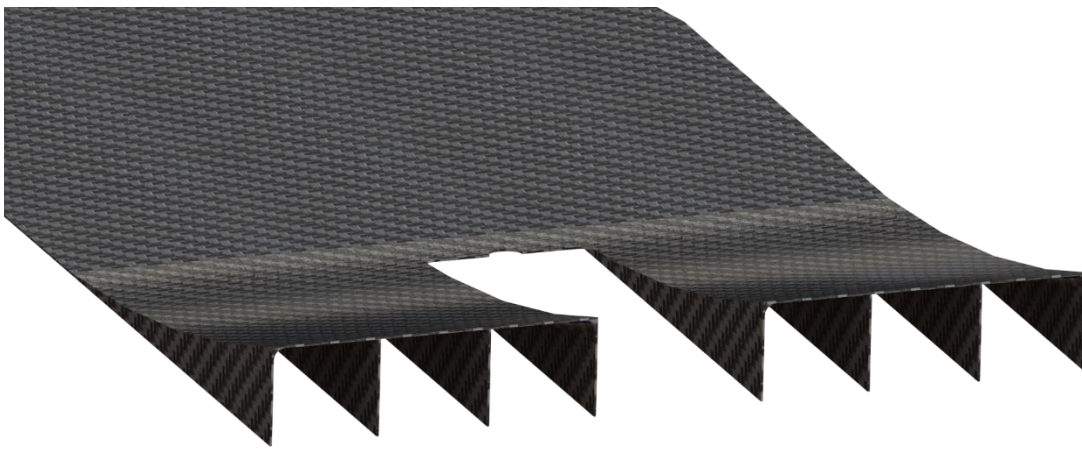


Figura 78: Difusor amb quatre aletes.

La implementació de les quatre aletes es mostra doncs com la solució més beneficiosa. Comparant ara amb el resultats de la simulació base, s'ha comprovat un augment del 6% en *downforce*, mantenint la *dragforce* constant. Es pot observar que la zona de pertorbació ha disminuït considerablement, fent que l'àrea efectiva del difusor augmenti.

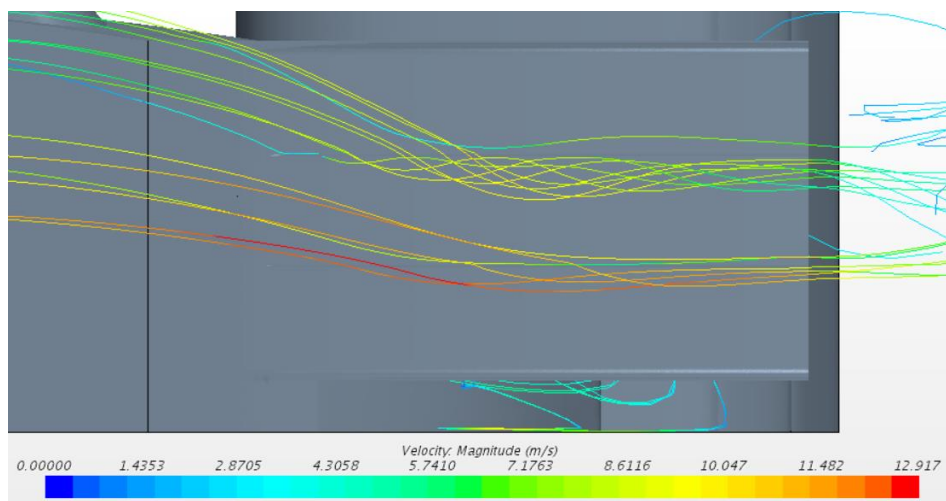


Figura 79: Vòrtex generats per les dues aletes.

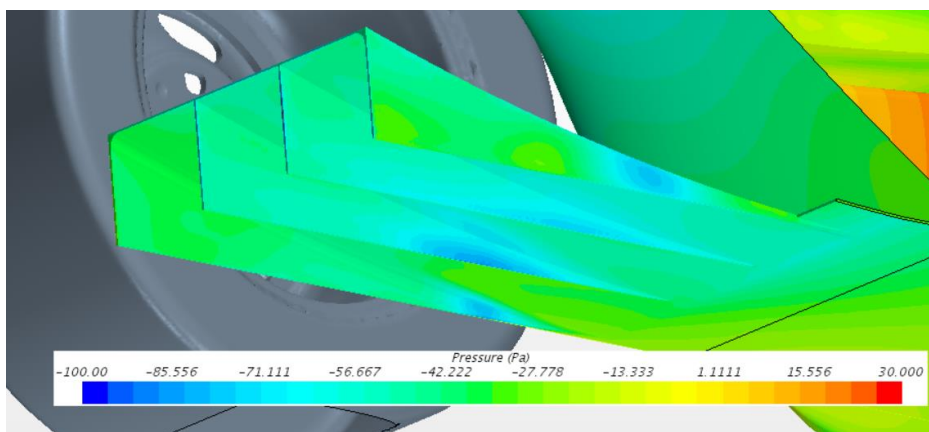


Figura 80: Zones de baixa pressió a les aletes.

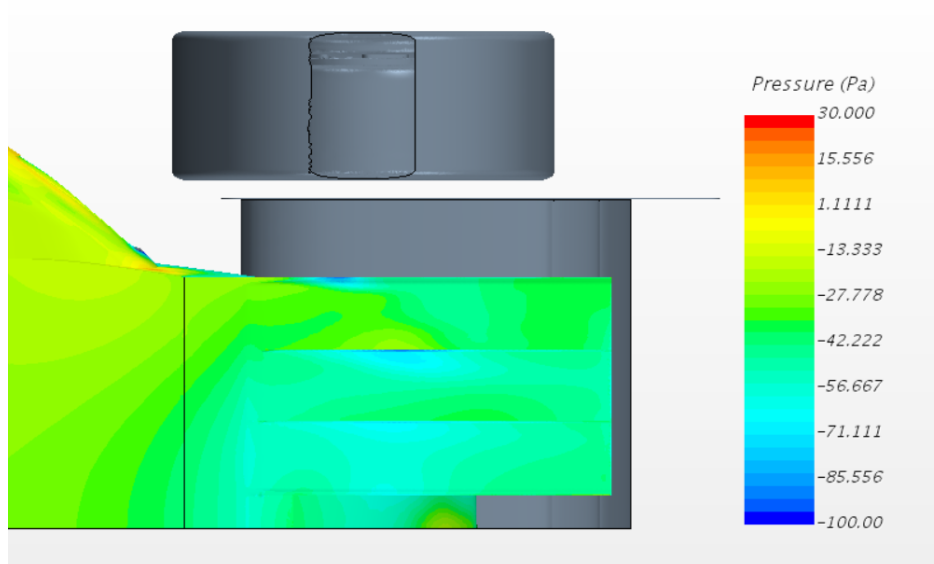


Figura 81: Gradient de pressió al difusor amb aletes.

## 6.4. Estudi de millores

Aspectes com els compromisos entre departaments de l'equip, decisions durant el disseny i el *timing*, han donat peu a que moltes de les mesures estudiades no hagin pogut ser implementades. Tot i així, en aquest apartat es detallen diverses alternatives per millorar el rendiment aerodinàmic del vehicle. Es tracta d'un estudi que abasta diversos factors que s'han de tenir present per futurs dissenys i es compara amb la simulació base abans esmentada.

### 6.4.1. Dimensionament

En aquest projecte s'ha procurat sempre aconseguir el menor pes possible. Per aconseguir aquest objectiu, s'han pres decisions de dimensionament que han posat en compromís el rendiment aerodinàmic. A continuació, es realitza un estudi sobre les millores que podria suposar un millor dimensionament.

Per una banda, s'ha realitzat una simulació en la qual el difusor no es trobava dividit en dos. Els beneficis que això pot donar són ínfims (1%), ja que, tot i augmentar l'àrea efectiva, la problemàtica que genera la roda posterior segueix present.

De la mateixa manera, mantenint el difusor en una sola peça, s'ha experimentat amb l'extensió i l'angle. S'ha simulat amb un difusor amb l'extensió màxima que es pot assolir segons la normativa per una banda, i un difusor amb un angle més pronunciat per l'altre. En cap dels casos s'ha vist una millora superior al 3%. Això demostra que fins que l'aire que arriba a la roda posterior sigui controlat, els canvis en el dimensionament del difusor representaran una mínima millora.

### 6.4.2. Espai lateral

L'espai que existeix en els laterals del monoplaça, entre les rodes, abasta una gran quantitat d'aire que pot ser perjudicial si no està controlat o beneficiar si es gestiona correctament. A continuació, es realitza un estudi de com aquest aire pot ser aprofitat en benefici de l'aerodinàmica del vehicle. Es tracta de solucions que tenen com objectiu evitar que l'aire arribi a la roda posterior i així minimitzar el seu efecte sobre el difusor.

Una de les solucions que es plantegen, encara que pugui semblar simple, és la de col·locar un panell vertical per tapar la roda posterior com el que es mostra en la Figura 82.



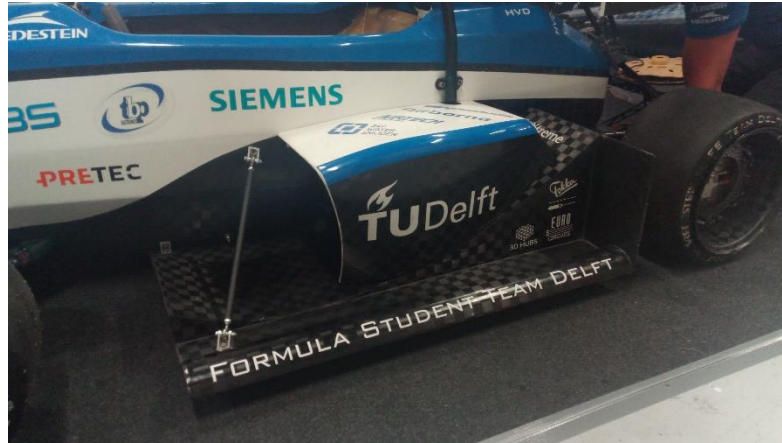


Figura 82: Panell vertical davant la roda posterior en un monoplaça de Formula Student

L'objectiu del panell vertical és el de bloquejar el flux d'aire cap a la roda posterior. És cert que d'aquesta manera augmentarà la força de resistència però el benefici en sustentació negativa els superen. Així doncs, s'ha dissenyat un panell vertical adaptat a la geometria del model així com es veu en la Figura 83.

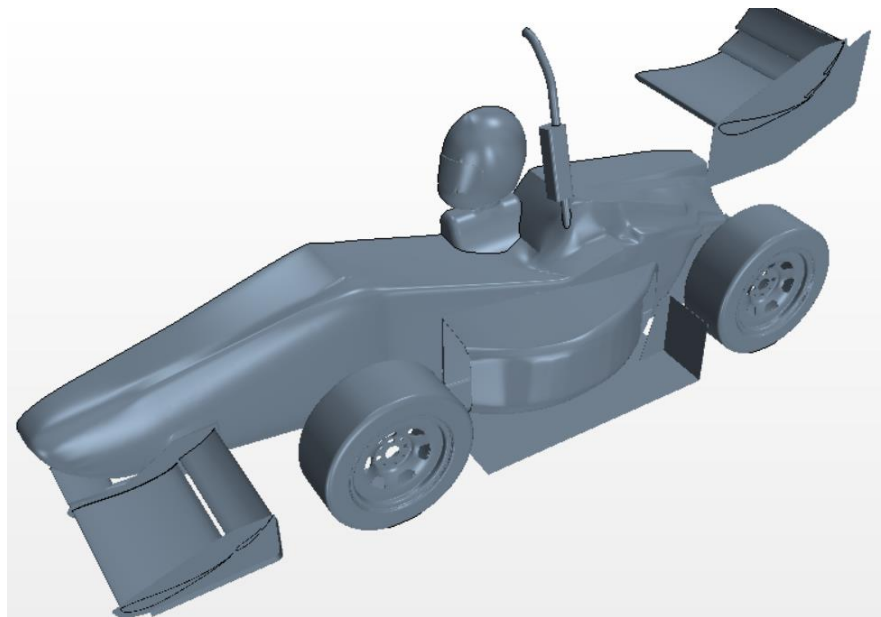


Figura 83: Panell vertical a roda posterior.

Segons els resultats obtinguts, s'ha registrat una millora del 12% en *downforce* respecte la simulació base, mentre que només un 4% en *drag*. Es pot observar que la influència de l'aire provinent de la zona de la roda ha desaparegut per complet. Per altra banda, s'ha de tenir en compte que les aletes abans implementades ja no servien per aquest cas, o si més no, s'hauria de realitzar un nou estudi de número i posicionament d'aletes.

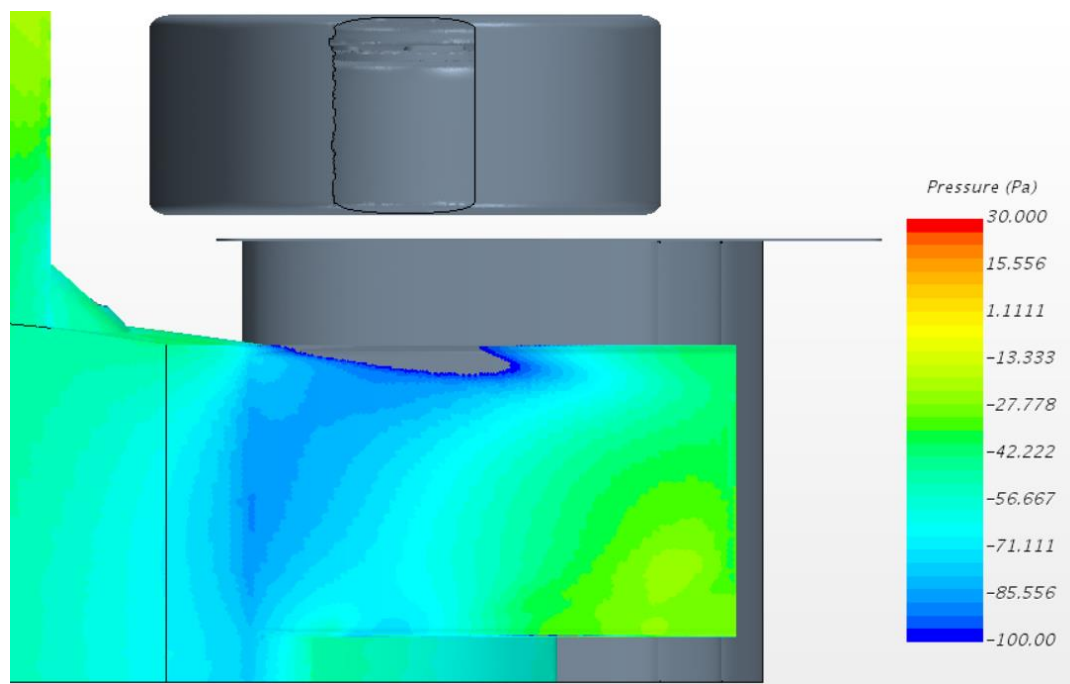


Figura 84: Gradient de pressió en difusor amb paret vertical a roda.

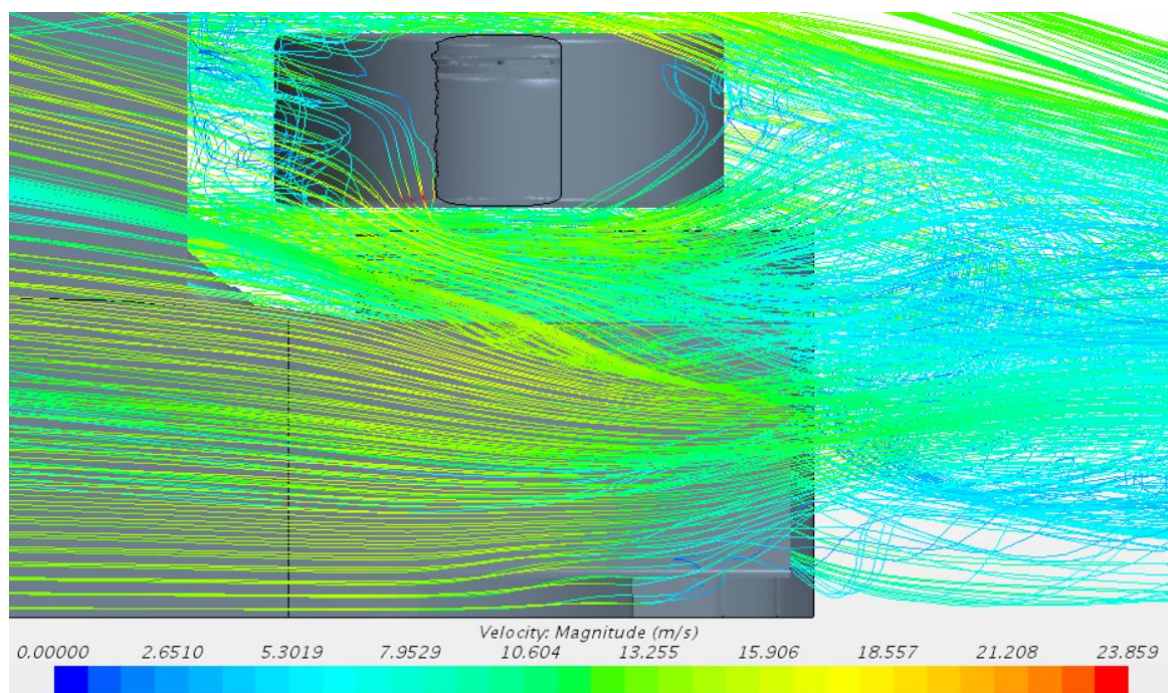


Figura 85: Línies de trajectòria de l'aire en el difusor amb la implantació d'un panell vertical davant la roda.

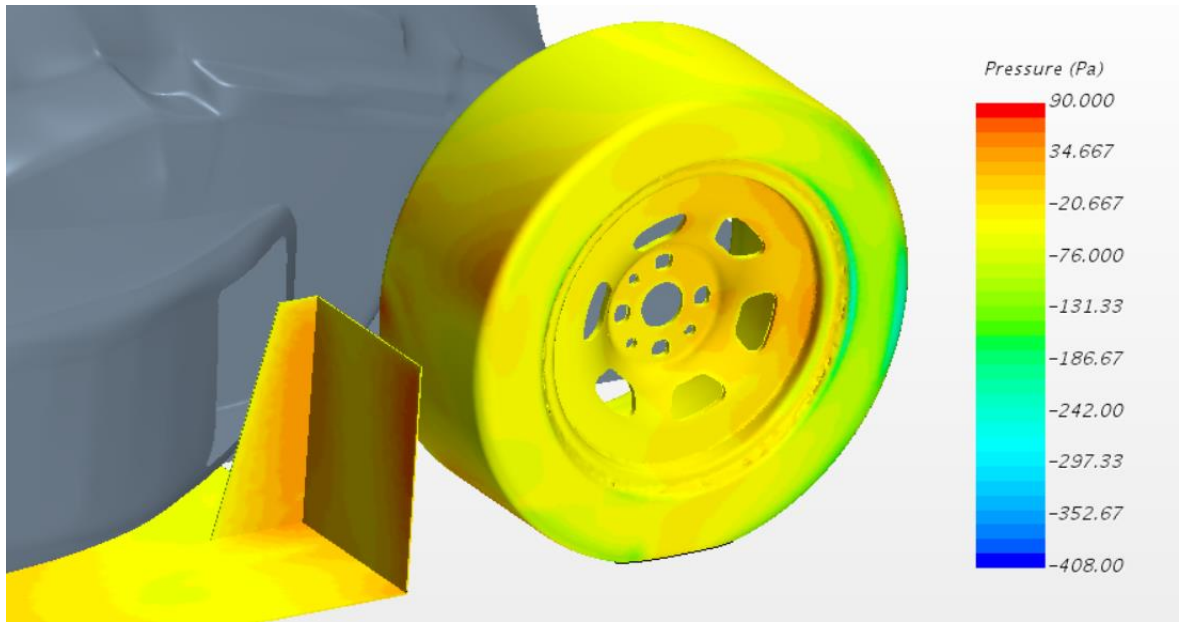


Figura 86: Distribució de pressió en el panell vertical i roda posterior.

Una alternativa al panell vertical és la implementació de *side wings*. Els *side wings* consisteixen en un conjunt d'alerons situats davant la roda posterior, la funció dels quals és exactament la mateixa que el panell vertical, tot i que, aquesta vegada, no només evitarien que l'aire interaccionés amb la roda, sinó que generarien un extra de *downforce*.



Figura 87: Exemple d'aplicació de side wings.



La implementació de *side wings* pot ser molt beneficiosa aerodinàmicament parlant, ja que aportant el mateix *drag* que el panell vertical, s'aconsegueix major valor de downforce, no només pel *side wings* en si, sinó també gràcies a la millora del comportament del difusor que suposa tapar la roda posterior.

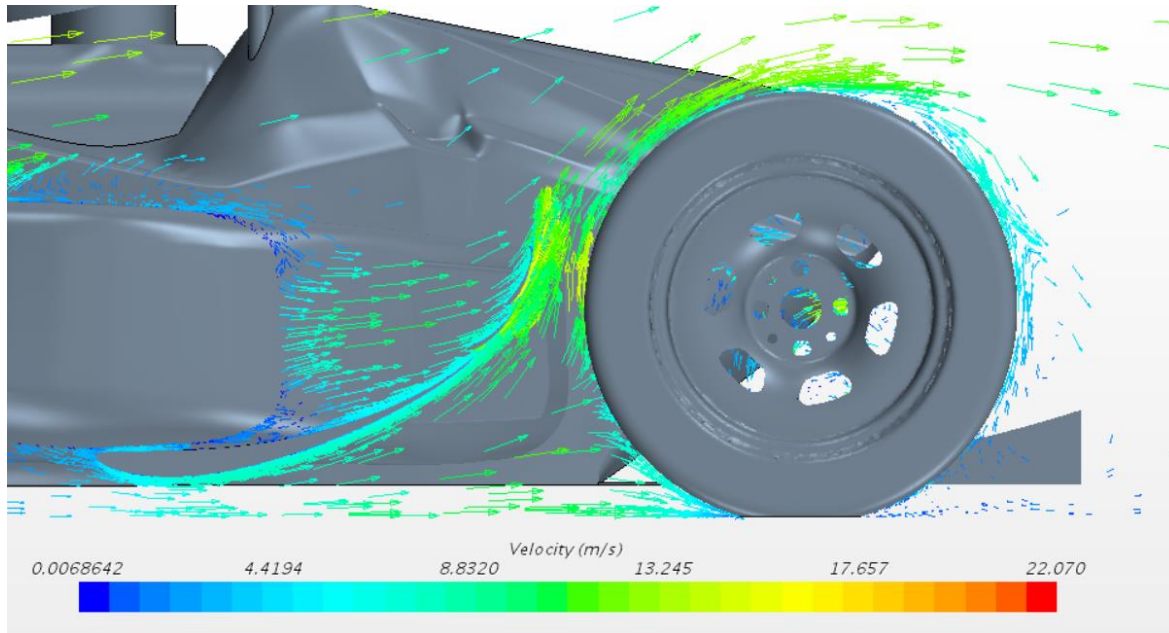


Figura 88: Vectors de velocitat en els side wings.

#### 6.4.3. Reducció de la mida de les rodes

Com s'ha explicat abans, les rodes poden afectar negativament al comportament aerodinàmic del cotxe, per tant, una reducció de la mida de les rodes pot minimitzar aquests efectes de manera important. El model estudiat porta rodes de 13 polzades; la reducció que es planteja és a 10 polzades. En la Formula Student es diu que el canvi a roda de 10 representa una millora dràstica en el comportament del vehicle, ja que redueix el pes, millora la dinàmica i l'aerodinàmica.

S'ha realitzat doncs una simulació amb la roda reduïda i s'han experimentat millores notables. Comparant amb la simulació base s'ha datat un augment del 19% en downforce i una disminució del 8% en *dragforce*.

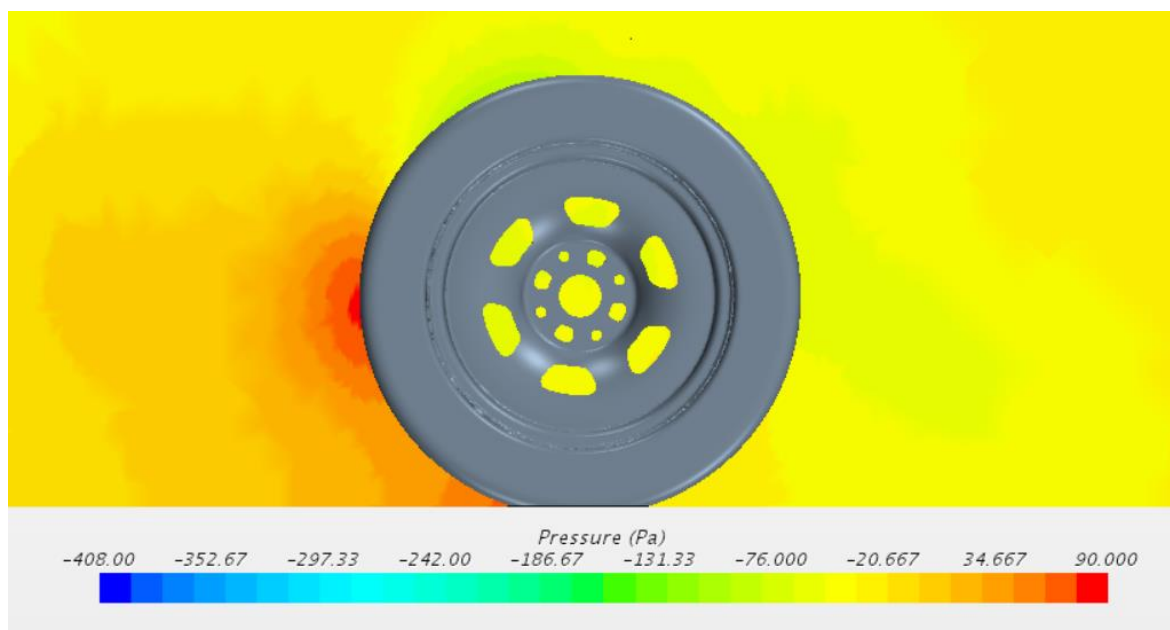


Figura 89: Distribució de pressió en la perifèria de la roda posterior 10'.

## 7. Fabricació del fons pla

### 7.1. Composites

Els *composites* són materials amb cada vegada més renom en el món de l'automobilisme de competició, per les seves propietats mecàniques i baix pes. Consisteixen en materials compostos formats per fibres sintètiques, que s'encarreguen de suportar les forces aplicades al material, i la matriu, que es limita a mantenir la cohesió entre totes les fibres i transmetre la força entre elles. Exemples de fibres són: la fibra de vidre, kevlar o la fibra de carboni. Pel que fa a les matriu, les principals que es fan servir són: resina epoxy, phenolic, bismaleimide.

Els *composites* es poden trobar en disposicions diferents:

- Fibres discontinues disposades de manera aleatòria
- Fibres disposades de manera unidireccional
- Fibres formant un teixit



Figura 90: A l'esquerra fibra unidireccional; a la dreta fibra de carboni en forma de teixit.

L'existència de diferents tipus de fibres i resines combinables dona lloc a un gran ventall de possibilitats de creació de materials segons la seva aplicació. En aquest projecte, i per raons de disponibilitat, s'ha fet servir fibra de carboni i resina *epoxy* com a material de fabricació.

#### 7.1.1. Fabricació

Existeixen diversos mètodes de fabricació de peces de materials compostos, tot i això en aquest projecte es parlarà de dos en concret: infusió i per fibres *prepeg*. Aquest dos mètodes són els més estesos en la fabricació de peces aerodinàmiques per a Formula Student i la seva principal diferència és l'estat inicial en que es troben les fibres.

#### 7.1.1.1. Fabricació per infusió

La fabricació per infusió consisteix en injectar la resina de cohesió entre les fibres per mitjà del buit. Aquest mètode parteix de les fibres en estat sec i la matriu en estat líquid, alhora separat en dues parts: el polímer i el catalitzador.

La infusió està formada per les següents etapes: laminació de les capes de fibra sobre el motlle, col·locació d'un sistema de tubs per la circulació de la resina, fer el buit mitjançant una bossa pròpiament segellada i injectar la resina. Una vegada desemmotllada la peça pot passar pel forn per ser curada i millorar així les seves propietats físiques.

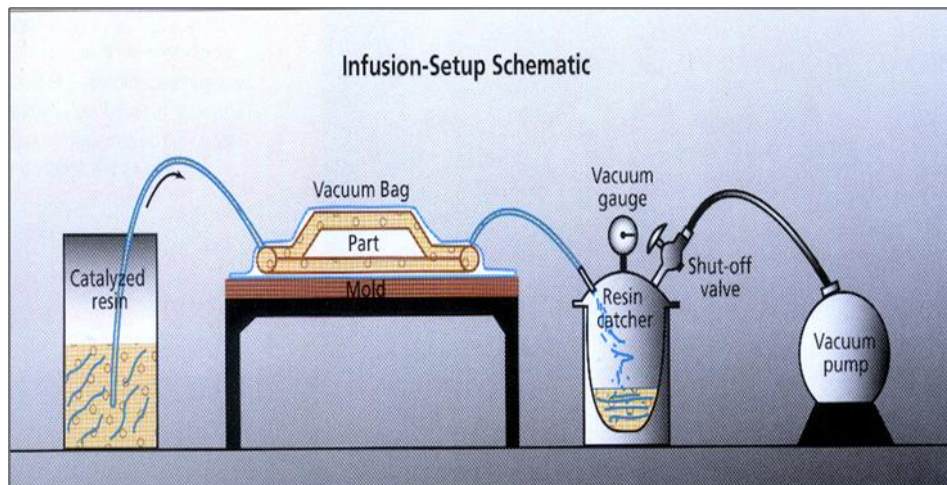


Figura 91: Fabricació per infusió.

#### 7.1.1.2. Fibres *prepeg*

Les fibres *prepeg* o fibres preimpregnades, a diferència de en la infusió, no es troba en estat sec, sinó que es troben impregnades de matriu.

Inicialment el procés de fabricació és el mateix que en infusió: es col·loquen les capes de fibra sobre el motlle, però aquesta vegada només s'instal·larà un sistema d'escapament per l'excés de matriu. De la mateixa manera, és posarà tot el conjunt al buit per, finalment, introduir-ho a un forn autoclau, és a dir, dins d'un forn que a més de controlar la temperatura a l'ambient, pot controlar la pressió.

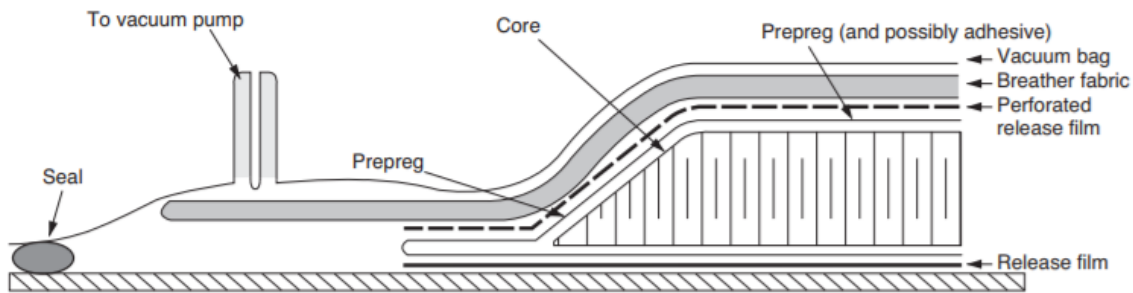


Figura 92: Fabricació amb fibres prepeg.

Ambdós processos permeten aconseguir peces amb bons acabats i propietats físiques, tot i així tenen certes avantatges i desavantatges un respecte l'altre. Per una banda, el procés d'infusió representa un menor cost dels materials respecte les fibres *prepeg*. En segon lloc, pel fet de que la fibra es trobar en estat sec, no és necessari conservar-la en ningun tipus de condicions ambientals, a diferència de les fibres *prepeg* que han de ser conservades en nevera o congelador per evitar el seu enduriment prematur. Per altra banda, les fibres preimpregnades permeten aconseguir peces amb un volum de fibra molt alt, pel que són més lleugeres i resistents que les fabricades per infusió. A més, el procés de fabricació, pel simple fet de no haver d'injectar-se resina de manera manual, representa un mètode menys complex i amb una durada més reduïda.

Tot i valorar-se els factor anteriorment descrits, una vegada més per motius de disponibilitat de material, la fabricació del fons pla s'ha realitzat mitjançant la infusió.

## 7.2. Simulació de composites

Per obtenir un correcte resultat en la fabricació del fons pla, s'ha fet servir el programa ANSYS, concretament l'ítem ACP (pre). L'ACP ens permet realitzar la simulació de fibres de l'element a fabricar, tenint present variables com el tipus de fibra utilitzada, el número de capes o la seva orientació. L'objectiu és validar la fabricació de l'element i comprovar que compleix amb el punt T7.5 de la normativa esmentada en l'apartat 1.3 d'aquest projecte.

ANSYS ACP permet, a partir d'una superfície donada, determinar la direcció de referència a partir de la qual s'establirà l'orientació de les fibres i l'ordre de superposició de cada capa. A la Figura 93, es pot veure la representació ANSYS sobre aquests aspectes.



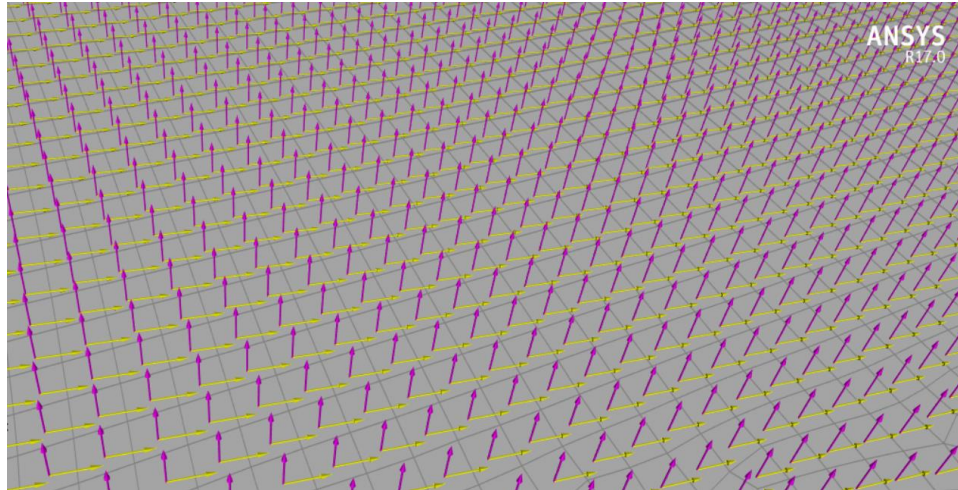


Figura 93: Orientació de fibres i capes segons Ansys.

Com s'explica en l'apartat 2.1, l'objectiu principal establert pel que fa a la fabricació és el de reducció de pes; aquest fet influeix en totes les decisions d'aquest disseny. Així doncs, el que s'ha procurat és el d'obtenir un fons pla amb el menor número de capes possibles sense posar en perill la seva pròpia integritat. Per aquest motiu, inicialment s'han diferenciat dues zones segons la seva funció.

Per una banda, s'ha diferenciat la zona de fons pla pròpiament dit, que inclou l'*inlet* i *throat*, en la que s'ha optat per una configuració amb tan sols 4 capes de fibra. Això és degut a que es tracta d'una zona que no rep cap tipus d'esforç i la seva única funció és la de crear una zona plana propera al terra. En aquest cas, la configuració o *layout* està formada per dues capes de 100 g/m<sup>2</sup> de fibra als extrems i dues de 400 g/m<sup>2</sup> en la part interior.

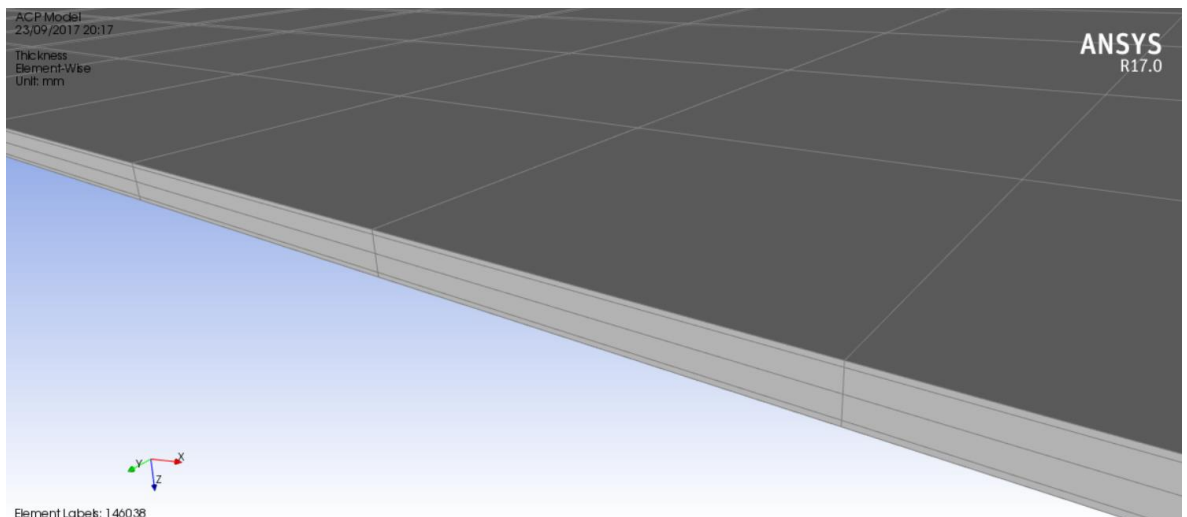
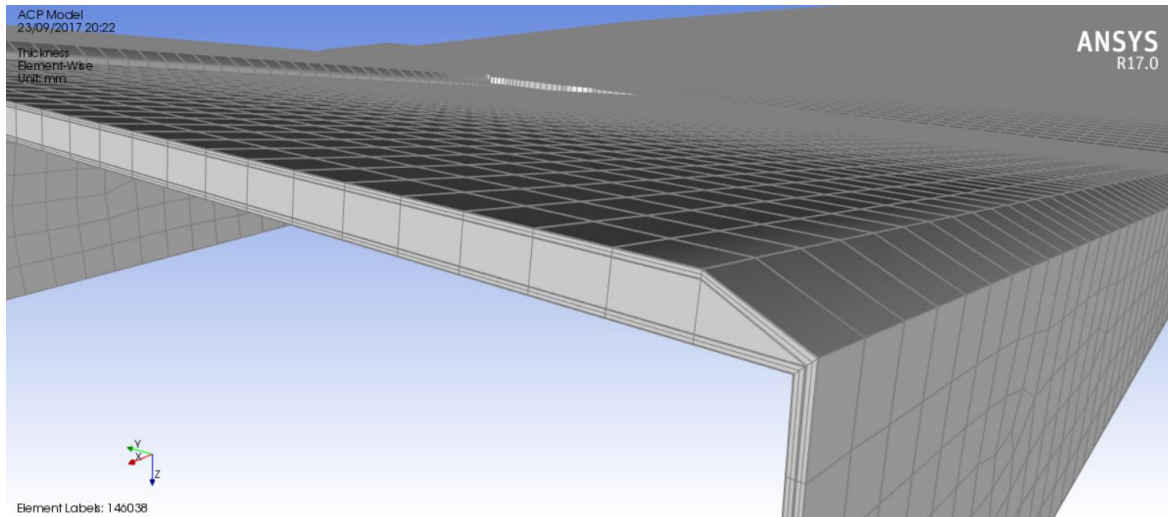


Figura 94: Representació de les 4 capes de fibra.

Per altra banda, des de els últims suports de la part plana fins el final del difusor s'ha optat per fer servir foam PVC per donar-li més rigidesa. S'ha escollit aquesta opció ja que, és en aquesta zona on es genera la separació de flux i on es produeixen majors vibracions. El PVC s'ha col·locat entre vuit capes de fibra, 4 capes en cada costat, repetint la mateixa configuració que pel fons pla.



*Figura 95: Representació de les 8 capes de fibra i el PVC foam.*

Segons el punt T7.5 de la normativa qualsevol element aerodinàmic ha de suportar una força de 50N en qualsevol punt i direcció, i no deformar-se més de 25 mm. Per altra banda, l'element ha de suportar una força de 200N repartits en una superfície de 225 cm<sup>2</sup> i no deformar-se més de 10 mm. Per valorar el comportament de la peça s'han realitzat aquests assajos en la zona posterior del difusor, ja que es tracta de la zona més allunyada de qualsevol suport i, per tant, més crítica.

Primerament s'ha avaluat la resposta de la peça en l'aplicació dels 50N en la direcció Z a l'extrem més allunyat. Com es pot observar, la deformació en aquest eix és de 11,12 mm que, tot i ser un valor alt, no arriba al límit permès.

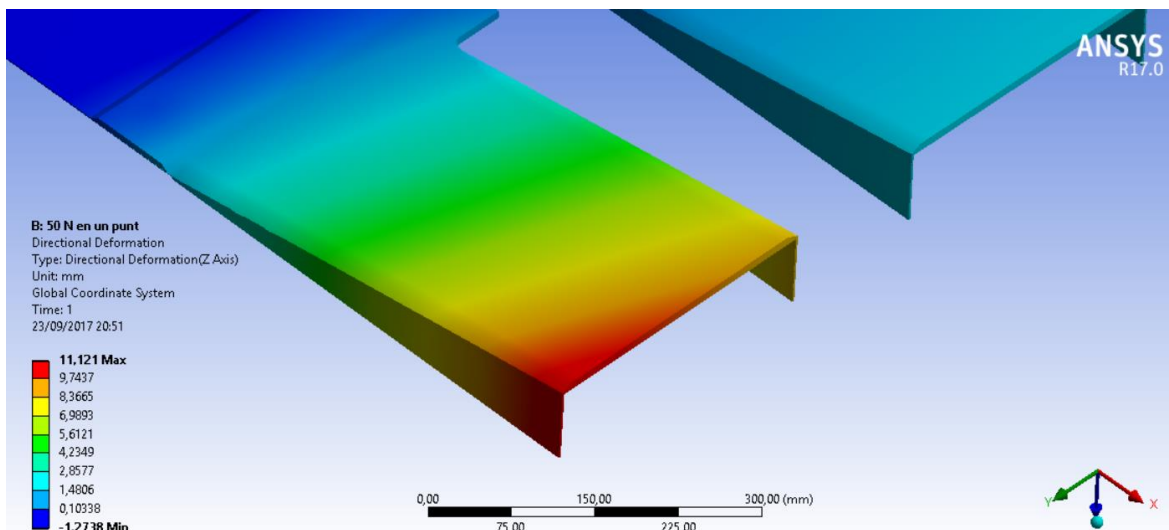


Figura 96: Deformació en aplicar 50N en un punt.

De la mateixa manera, s'ha estudiat la deformació de la peça en aplicar els 200N repartits en una superfície de  $225\text{cm}^2$  en la direcció de l'eix Z. Aquesta vegada, els resultats mostren una deformació de 30,65 mm que sobrepassen els 10 mm permesos.

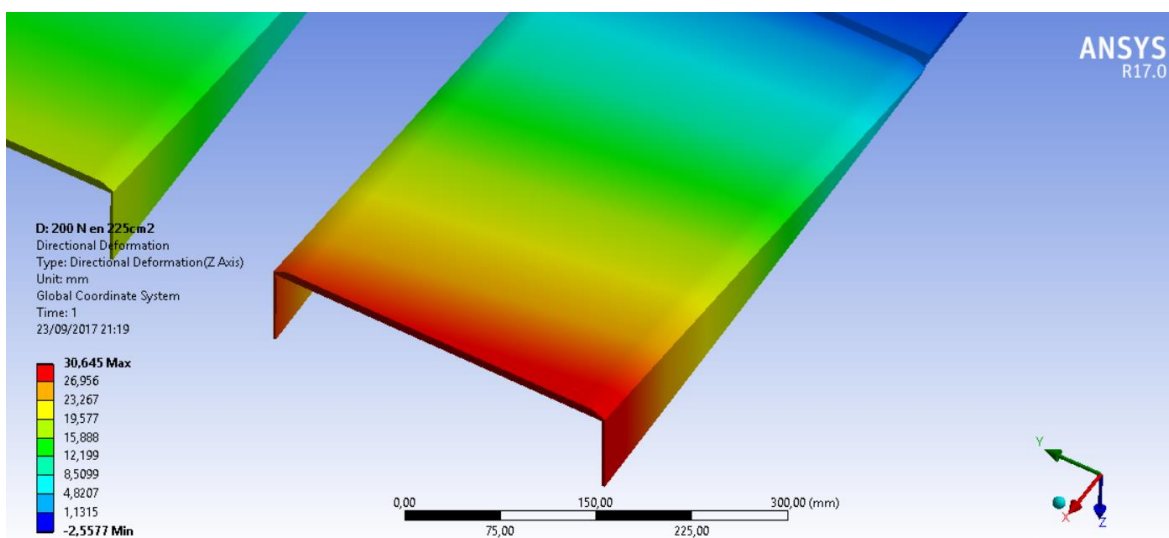


Figura 97: Deformació en aplicar 200N en una superfície de  $225\text{cm}^2$ .

Per resoldre aquesta situació s'ha decidit estudiar la implementació de dos punts de suport en la zona en voladís. Així doncs, es repeteixen els mateixos assajos, ara però, tenint present aquests punts de suport. Observant l'assaig dels 50N en un punt, es veu una reducció de la deformació fins a 0,75 mm.

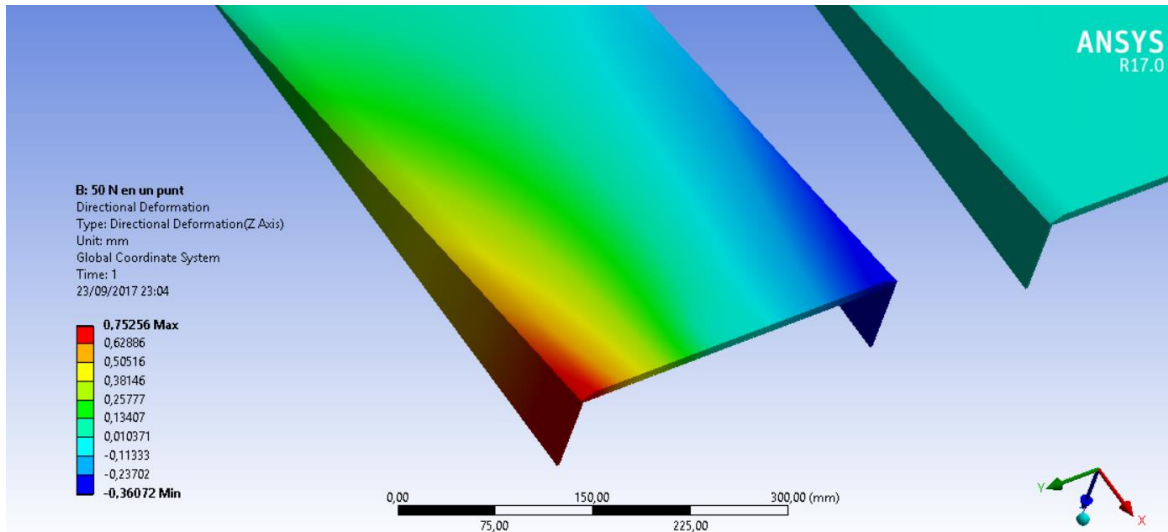


Figura 98: Deformació en aplicar 50N en un punt amb tensor.

Pel que fa als 200N en una superfície de  $225\text{cm}^2$ , es genera una deformació de 0,15 mm que, ara sí, compleix amb la normativa establerta.

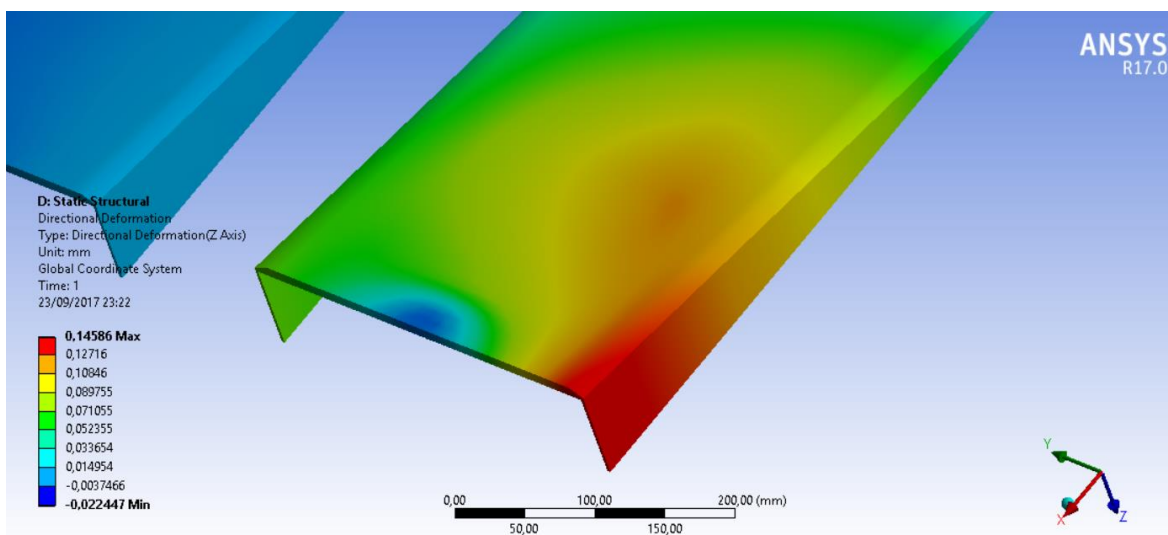


Figura 99: Deformació en aplicar 200N en una superfície de  $225\text{cm}^2$  amb tensor.

### 7.3. Procés de fabricació

A continuació, es detallen totes les etapes de fabricació del fons pla.

#### 7.3.1. Material

El material utilitzat per la fabricació de la peça és el següent:

- Fibra de carboni:  $100\text{ g/m}^2$  i  $400\text{ g/m}^2$

- Motlle de placa màster
- Foam PVC
- Guants de làtex
- Paper d'escata: P240 i P120
- Cera desemmotllant
- Tisores
- *Cutter*
- Espàtula
- *Econobreaker*



*Figura 100: Econobreaker.*

- Adhesiu TC42



*Figura 101: Adhesiu TC42.*

- P-21 (sangrador)



*Figura 102: Sangrador P-21.*

- Peel ply



*Figura 103: Peel ply.*

- Reixa de distribució
- Tub en espiral



*Figura 104: Tub en espiral.*

- Entrada en T



*Figura 105: Entrada en T.*

- Tub d'entrada i sortida
- Bosses de buit
- Resina epoxy



*Figura 106: Resin epoxy.*



- Cubell
- Radial

### 7.3.2. Encerat i lustrat

Primerament s'ha de realitzar la preparació prèvia del motlle. Tot i que aquests presentin un bon acabat, és recomanable donar-li una passada amb el paper d'escata (P240) per reduir les possibles imperfeccions superficials que puguin haver-hi. És important en aquest moment llimar també els cantons vius del motlle, ja que poden interferir en el moment en que es fa el buit o a l'hora de desemmotllar.



*Figura 107: Motlle en el seu estat inicial.*

Una vegada llimat, es procedeix a l'encerat i lustrat. Aquesta etapa és de suma importància ja que facilitarà el desemmotllament de la peça una vegada s'hagi realitzat la infusió. L'encerat consisteix en aplicar cera desemmotllant de manera homogènia a la superfície del motlle. Una vegada hagi reposat 20 minuts es procedeix al lustrat per extreure aquella cera que no s'hagi absorbit. Aquest procés s'haurà de repetir al menys 7 vegades per assegurar així un bon desemmotllament.

### 7.3.3. Laminació

La laminació consisteix en la superposició de les diferents capes de fibra seca sobre la superfície del motlle. Es fa servir adhesiu TC42 per assegurar que les capes quedin juntes i en contacte amb la superfície. Les capes de fibra s'hauran de retallar de manera que aquestes s'adaptin correctament a la forma del motlle.

Com s'ha explicat a l'apartat 7.2 primerament es laminarà una capa de 100 g/m<sup>2</sup>, llavors dues de 400 g/m<sup>2</sup> i novament una de 100 g/m<sup>2</sup>.



*Figura 108: Capa de 100 g/m<sup>2</sup>.*



*Figura 109: Capa de 400 g/m<sup>2</sup>.*



#### 7.3.4. Infusió

Una vegada les capes de fibra han sigut laminades satisfactòriament, és hora de preparar el conjunt per la infusió. Com es pot observar en la Figura 110, en la zona del difusor, pel fet de que posteriorment es posarà nucli de foam, és necessari col·locar *peel ply* abans de la infusió. El *peel ply* et permet, una vegada realitzada la infusió, aconseguir un acabat superficial òptim per poder enganxar-hi el nucli. A més, es posicionen tires de *peel ply* per on es col·locarà el circuit de sortida de resina.

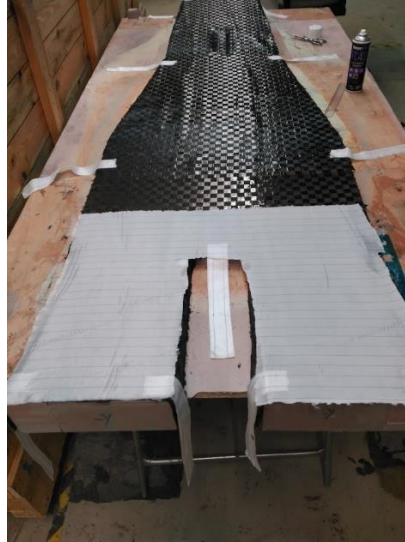


Figura 110: Peel ply a la zona del difusor.

El proper pas és el d'aplicar P21 i reixa de distribució a tota la zona de fibra. El P21 permet una distribució homogènia de la resina, mentre que la reixa facilita la seva ràpida distribució per tota la peça.



Figura 111: P21 i reixa de distribució sobre la fibra.

Seguidament es col·loca el sistema de circulació de la resina. Per una banda, en la part interior, els tubs d'entrada de resina. S'instal·len, en aquest cas, dues entrades en forma de "T" per on entrarà la resina. Per altra banda, en la part exterior, el tub de sortida, connectat a la superfície del motlle mitjançant les tires de *peel ply* i, també amb dues sortides en forma de "T". És en el tub de sortida des d'on s'aplica el buit i es succiona la resina.

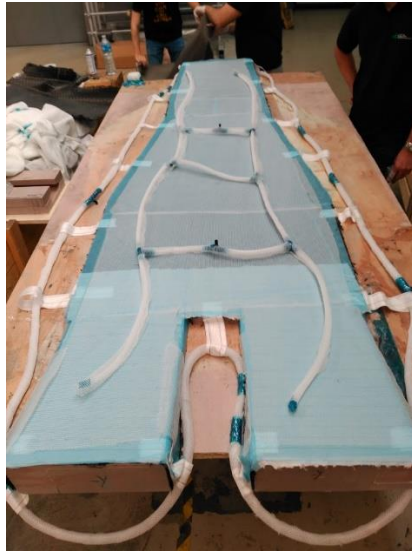


Figura 112: Circuit d'entrada i sortida de resina.

S'instal·len llavors els tubs d'entrada i sortida des de les "T" prèviament situades. És hora doncs de fer el buit al conjunt i realitzar la infusió. Per realitzar el buit es tanca tot el conjunt dins d'una bossa pròpiament segellada.



Figura 113: Realització del buit.

S'ha de comprovar de que no quedin zones de bossa en tensió, ja que són zones propenses a foradar-se. A més, s'ha de verificar de que no existeixen fuites, ja que sinó podria donar-se una mala distribució de la resina. Per comprovar que el buit es realitza correctament pot mesurar-se el cabal d'aire des d'una certa vàlvula. Per a peces relativament petites el cabal no hauria de superar  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , per poder considerar que per dins la bossa no hi circula aire i, per tant, que el conjunt es troba en el buit. Pel cas del fons pla, pel fet de tractar-se d'una peça de gran extensió, un cabal de  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  pot considerar-se vàlid.



*Figura 114: Comprovació del buit.*

Per la realització de la infusió s'ha de barrejar primerament els components de la resina: per cada 100 parts del polímer, 33 de catalitzador. Una vegada barrejada la mescla es tenen aproximadament 30 minuts per injectar-la a la peça, abans que catalitzi. Així doncs, fent servir el tub d'entrada i la succió proporcionada pel buit, s'injecta la resina fins que aquesta queda cobreix tota la peça.



*Figura 115: Resina cobrint la peça.*

Sense deixar de fer el buit, la peça haurà d'estar curant-se aproximadament 24 hores a temperatura ambient.

#### 7.3.4.1. Zona del difusor

Com que la zona del difusor porta nucli de foam s'haurà de realitzar una nova infusió. Primerament, es desfà el sistema anteriorment muntat. Gràcies a l'aplicació del *peel ply*, la zona del difusor presenta un acabat amb una certa rugositat que permet una òptima adherència del nucli.

Es retalla el nucli segons la geometria desitjada, s'encola i s'enganxa a la zona posterior de la peça. S'han de realitzar petit forats en el nucli per permetre el pas de la resina. Una vegada enganxat el foam, s'ha de realitzar tot el procediment de nou, tot i que ara la laminació i infusió només es realitzarà en la zona del difusor.



Figura 116: Nucli de foam en el difusor.

#### 7.3.5. Desemmotllar i preparació final

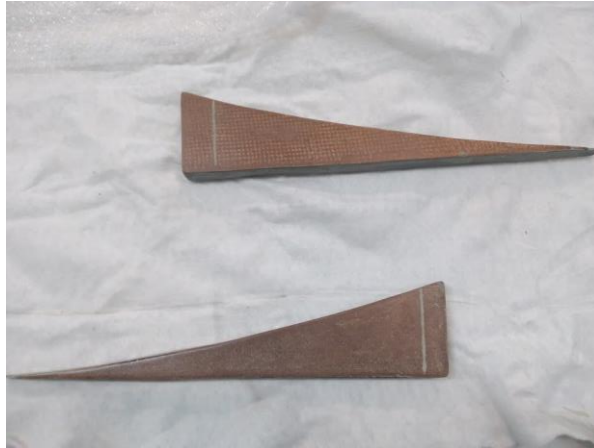
Finalment, s'ha de desmuntar de nou el sistema de tubs i bossa de buit, i extreure el P21 i la reixa. Per desemmotllar la peça cal fer ús d'espàtules per aplicar forces en diversos punts, tenint molta cura de no trencar la peça. Si s'ha encerat correctament el motlle no hauria de presentar cap problema per realitzar un bon desemmotllament.

Una vegada desemmotllat es col·loca al forn per la curació. El curat és un procés en el que es realitzen increments de temperatura periòdics per així millorar les propietats físiques de la peça. En aquest cas, s'ha incrementat des dels 60 °C fins als 80 °C en intervals de 5° cada hora.

L'últim pas consisteix en retallar els sobrants de fibra, llimar la superfície per aconseguir un millor acabat i realitzar les perforacions per l'acoblament al xassís.

### **7.3.6. Fabricació de les aletes**

La fabricació de les aletes del difusor s'ha realitzat segons la mateixa metodologia que per la resta de la peça; la única diferència que presenten és l'ús de motlles de fusta tallats manualment. En ser peces de geometries senzilles s'ha optat per fer servir fusta com a solució més econòmica.



*Figura 117: Motlles dels divisors.*

Com s'ha dit abans, s'han seguit els mateixos passos anteriorment descrits, tot i que en aquest cas, s'ha hagut de tenir especial cura en deixar un bon acabat superficial inicial, ja que la fusta presenta major rugositats. A més, pel fet de ser peces de mida reduïda, el procés de laminació i infusió ha guanyat en complexitat. Tot i això, el resultat ha sigut satisfactori i han pogut ser acoblat al difusor per mitjà de bicomponent.



*Figura 118: Divisors del difusor.*



## 8. Actuació i manteniment

Un dels aspectes a destacar com a resultat d'aquest projecte és el poc pes que ha suposat al pes total del vehicle. Tot i ser un element de gran extensió, gràcies al baix número de capes de fibra del que està compost i la distribució del nucli de foam només a les zones on realment era necessari, han donat lloc a un fons pla de menys de 4,5 kg.



Figura 119: E79 abans de la competició.

En quant al seu comportament en carrera, no s'han observat cap tipus de vibracions. El difusor ha mostrat un gran índex de rigidesa tant en recta com en corba. Aquest comportament ha sigut gràcies en part a l'actuació dels tesors, que han demostrat ser una solució molt vàlida pels possible problemes de rigidesa. S'ha de tenir present que, en trobar-se sempre en tensió, els tensors han de ser controlat periòdicament. Pot donar-se que es deformin plàsicament i deixin de realitzar la seva funció correctament. Es per això, que es recomana canviar-los cada mes o abans d'una competició.



Figura 120: Monoplaça en carrera.

Un dels aspectes que s'ha d'avaluar també és el comportament de les aletes del difusor. Es recorda que han sigut acoblats mitjançant bicomponent. Tot i haver realitzat moltes sessions de test, llarg trajectes i dues competicions, la unió entre el difusor i els divisors no s'ha vist afectada en cap cas. De nou, es recomana un seguiment de l'estat de l'adhesiu, però es pot concloure que és una bona manera d'unir elements de fibra.



Figura 121: Difusor per la part posterior.

Finalment, comentar l'actuació de la *Quick Jack*. Tot i no ser un element d'estudi d'aquest projecte, és interessant valorar el seu comportament, ja que el fons pla ha hagut de ser modificat per aquest motiu. S'ha de dir que la *Quick Jack*, no només estava delimitada per la divisió central del fons pla, sinó que també havia d'interactuar amb els elements de transmissió anteriorment descrits. El fet d'haver

d'afectar a tants elements ha dificultat la seva acció i ha causat diversos problemes durant la competició. Així doncs, es recomana per propers disseny estudiar noves maneres de realitzar la *Quick Jack*.



Figura 122: Vehicle en posició de Quick Jack.



## 9. Anàlisi de l'impacte ambiental

En general, l'impacte ambiental que suposa la fabricació de peces de fibra és alt, ja que els processos pel que ha de passar representen un cost energètic important. A més, tot i que les tècniques de reciclatge de fibra estan actualment en progressió, segueix sent un dels aspectes limitants una vegada s'ha acabat la seva vida útil. En aquest apartat es valora l'impacte ambiental que ha representat tant la fabricació de la peça, com l'energia necessària per l'obtenció de la matèria primera.

Segons les fonts consultades, el consum energètic per l'obtenció de la fibra de carboni s'estima d'uns 183 MJ/kg. Per fabricar aquest fons pla s'han fet servir uns 5 kg de fibra, això dona com a resultat uns 915MJ d'energia consumida.

Seguidament, es valora el cost energètic en la fase de disseny. Aquest cost prové de les despeses energètiques dels ordinadors i computadores utilitzades durant el disseny i simulacions CFD. S'ha de tenir present que cada simulació en 3D pot suposar fins a 8 hores de càlcul, amb l'energia que això suposa. En aquest apartat, no només s'han avaluat les hores de simulació que s'expliquen en aquest projecte, sinó que també es sumen les hores d'aquelles simulacions o estudis considerats no vàlids. Així doncs, s'han estimat unes 2000 hores de consum d'ordinador (140kWh) i unes 7000 hores de computadora d'alt rendiment (2000kWh). Això dona com a resultat uns 7704 MJ.

Durant el procés de fabricació de la peça en sí, només s'han considerat les despeses energètiques del forn pel curat, ja que la resta de processos són bàsicament manuals. Així doncs, s'han valorat les 4 hores d'ús del forn (80kWh), donant com a resultat 288 MJ. Això sumant als consums anteriorment explicats donen una energia consumida de 8907 MJ.

Un dels aspectes que cal tenir present si es parla de l'impacte ambiental en la fabricació de peces de fibra de carboni, és les conseqüències que poden ocasionar a la salut humana. Els principals perills per la salut es generen durant la manipulació, ja que les fibres es trenquen amb facilitat i poden convertir-se en pols. Aquesta pols, de no ser controlada, pot generar irritació en la pell, en les membranes i mucoses del sistema respiratori. Es per això que durant la fabricació d'aquesta peça, i qualsevol peça de fibra, s'han hagut de prendre mesures de protecció: s'ha treballat sempre amb guants, roba de màniga llarga, ulleres, mascareta, i tot en un ambient controlat on la pols era aspirada contínuament.



## Conclusions

El fons pla és l'element aerodinàmic que millor relació  $Cl/Cd$  presenta. La poca força de resistència que suposa davant els beneficis que pot aportar en quant a sustentació negativa, donen peu a que sigui un element vital per aconseguir el millor rendiment aerodinàmic d'un monoplaça. Tot i això, aconseguir que el fons pla treballi eficientment no és fàcil, ja que és influït en gran mesura per tota la resta d'elements que formen el vehicle. La influència és tal, que el disseny d'un conjunt aerodinàmic ha d'entendre's com un tot, en el qual els elements es desenvolupin simultàniament, buscant sempre la òptima interferència entre ells.

En aquest projecte s'han aconseguit abastar totes les etapes de desenvolupament d'un fons pla, des del disseny fins la fabricació, i així crear una base sòlida pe futurs dissenys. S'han realitzat simulacions de rigor amb les quals s'ha experimentat amb el comportament de l'aire a través de la peça i s'ha buscat l'opció òptima.

En quant als resultats obtinguts, si bé un increment del 6% del *downforce* per l'acció del difusor pot semblar poc, en el món de l'automobilisme de competició són aquests detalls els que marquen la diferència. El difusor ha ajudat a assolir el valor de *downforce* total a 190 N a 45 km/h. Sabent que es poder arribar a velocitats sobre els 60 km/h, es parlaria llavors d'un *downforce* total de 336 N, un valor més que considerable. S'ha de tenir present que hi ha hagut aspectes externs a aquest projecte que han limitat el potencial de la peça.

S'ha demostrat que el fons pla pot arribar a donar molt més en termes d'aerodinàmica si es té present la influència que hi exerceixen la resta d'elements. Concretament, la roda posterior s'ha demostrat que té un gran impacte en el comportament del difusor. Així doncs, es recomana prioritzar els esforços en entendre i estudiar l'aire en la zona lateral i actuar en conseqüència. La implementació de *side wings* sembla una millora considerable en aquest sentit, ja que no només s'evita l'aire en la zona de la roda, sinó que es pot arribar a generar extra *downforce*.

Pel que fa a la fabricació, si bé és cert que l'experiència que es té d'anys anterior permet aconseguir bons resultats, la implementació de la simulació de fibra podria significar un gran salt de qualitat en el procés de manufactura. Mitjançant les simulacions de fibra es poden optimitzar les peces, reduint el pes, millorant les propietats o trobant els millors punts de suports.

Un dels aspectes en que s'ha de millorar és en les tasques de validació. La validació permet saber a ciència certa que tots aquells càlculs i simulacions que s'han realitzat són correctes. En aerodinàmica, es procedeix a verificar els resultats en túnel d vent, ja sigui amb un model a escala o real. Si no es té accés a túnel de vent, un dels mètodes que es fan servir és el de enganxar cordills a la superfície que

es vol estudiar i observar, en carrera, el moviment que l'aire genera per determinar si es troba enganxat o no. També, com exercici de validació, es pot realitzar un test on s'avaluï el temps per volta amb el conjunt aerodinàmic o sense.

## Pressupost

A continuació, es desglossa el pressupost que ha suposat la realització d'aquest projecte, tant en la fase de disseny com en la fabricació. S'ha de valorar que s'ha tingut accés a molts d'aquests recursos gràcies al patrocini amb empreses del sector. Es divideixen doncs els costos com a costos d'enginyeria i costos de fabricació.

Taula 5: Costos d'enginyeria.

CONCEPTE	QUANTITAT	COS UNITARI	COST TOTAL
Hores enginyer junior	700	20 €/hora	14.000€
Hores enginyer senior	20	50€/hora	1.000€
Llicència Ansys 17.0	1	17.500 €/licència	17.500€
Llicència Solid Works 2016	1	5.500 €/licència	5.500€
Llicència STAR-CCM+ (CD Adapco)	1	68.000€/licència	68.000€
Hores de simulació CSUC	7000	0,05 €/HC	350€
		<b>TOTAL</b>	<b>106.350€</b>

Taula 6: Costos de fabricació.

CONCEPTE	QUANTITAT	COS UNITARI	COST TOTAL
Fibra de carboni 100g/m <sup>2</sup>	4 m <sup>2</sup>	9,50 €/m <sup>2</sup>	38,00€
Fibra de carboni 400g/m <sup>2</sup>	4,5 m <sup>2</sup>	12,95 €/m <sup>2</sup>	58,28€
Resina epoxy	5 L	22,87 €/L	114,35€
Cera desemmotllant	1	26,60 €/ud	26,60€

Peel ply	1 m2	1,5 €/m2	1,50€
P21	2 m2	1 €/m2	2,00€
Reixa de distribució	3 m2	1,90 €/m2	5,70€
Bossa de buit	30 m2	1,21 €/m2	36,30€
Tubs de circuit de resina	20 m	1,30 €/m	26,00€
Curat al forn	4 hores	6 €/h	24,00€
Cargols M4 DIN 933	14	0,87 €/ud	12,18€
Rosques DIN 982	14	0,40 €/ud	5,60€
Volanderes	28	0,27 €/ud	7,56€
Cable acer	1	2,70 €/ud	2,70€
Mecanitzat dels motlles	-	-	2.000,00€
Mecanitzat dels suports	-	-	200,00€
Hores operari	500	22 €/h	11.000,00€
Hores supervisor	100	50 €/h	5.000,00€
		<b>TOTAL</b>	<b>18.560,77€</b>

Taula 7: Cost total.

CONCEPTE	COST
Cost enginyeria	106.350,00€
Cost fabricació	18.560,77€
<b>TOTAL</b>	<b>124.910,77€</b>

## Bibliografia

- McBeath, S., 2005. *Aerodinámica del automóvil de competición*. CEAC. ISBN 9788432911675.
- Milliken, W. i D., 1995. *Race car vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers. P. 83-110, 489-570. ISBN 1-56091-526-9.
- Katz, J., 1995. *Race Car Aerodynamics*. Bentley Publishers. P. 200-208 . ISBN 0-8376-0142-8.
- Jensen, K., 2010. *Aerodynamic Undertray Design for Formula SAE*. Oregon. Tesi pel Masters of Science in Mechanical Engineering a Oregon State University.
- Bangalore, G., 2015. *Desing and Optimization of Undetray for Formula SAE Race Car using CFD Analysis*. Texas. Tesi pel Master of Science in Mechanical Engineering a AT Arlington.
- Dalmases, N. i Ràfols, L., 2011. *Estudi aerodinàmic del fons pla d'un monoplaça*. Castelldefels. Treball de fi de carrera a l'Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i Aeroespacial de Castelldefels.
- Martín, T., 2017. *Estudi del disseny d'un xassís monocasc per un monoplaça de Formula Student*. Barcelona. Treball de fi de carrera a l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est.
- Pérez, V., 2017. *Desarrollo de elementos aerodinámicos del prototipo Formula Student E-tech Racing*. Barcelona. Treball de fi de carrera a l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est.
- *HexPly Prepeg Technology*. 2016. Hexcel Corporation.
- Ansys ACP Tutorial. Yousefi, A., Lancaster University. <https://www.udemy.com>
- *CFD Online*. <https://www.cfd-online.com/>.
- *Steve Portal*. <https://thesteveportal.plm.automation.siemens.com/>
- *Diffusers, Engineering basics, Aerodynamics*. <http://www.racecar-engineering.com/technology-explained/diffusers-engineering-basics-aerodynamics/>

- Toet, W., 2017. *Motorsport diffusers*. Race Tech.  
<http://www.racetechnmag.com/2017/08/willem-toet-explains-motorsport-diffusers/>
- KYLE.ENGINEERS *Youtube Channel*. <https://www.youtube.com/user/Kyleengineers>
- Composites Design and Manufacture.  
<https://www.fose1.plymouth.ac.uk/sme/MATS347/MATS347A9%20NFETE.htm>



## **Annex A**

### **A1. Taules**

#### **Relació de taules:**

Taula 8: Convergència de malla.

Taula 9: Influència de l'altura.

Taula 10: Dimensionament d'angle.

Taula 11: Dimensionament de longitud.

Taula 12: Dimensionament de curvatura.

Taula 13: Resultats simulació 3D.

Taula 8: Convergència de malla.

Nº CELLS	CPU TIME	Drag Coefficient (Cd)	Lift Coefficient (Cl)
180632	328,66	0,01899	-0,31173
245865	459,87	0,01732	-0,31073
257135	589,92	0,01673	-0,30543
396287	818,65	0,01726	-0,30489
410358	753,23	0,01893	-0,30725
444107	647,05	0,01898	-0,30904
453079	667,65	0,01899	-0,30987
453588	564,28	0,01899	-0,30987
457974	490,68	0,01900	-0,30977

Taula 9: Influència de l'altura.

ALTURA (mm)	Drag Coefficient (Cd)	Lift Coefficient (Cl)
5	0,02942	0,37121
10	0,02934	-0,00571
15	0,02835	-0,15105
20	0,02658	-0,24079
25	0,02466	-0,28626
30	0,02300	-0,30194
35	0,02146	-0,31670
40	0,02015	-0,30794
45	0,01899	-0,30987
50	0,01799	-0,31172
60	0,01638	-0,30302
80	0,01410	-0,27278
100	0,01262	-0,23884

Taula 10: Dimensionament d'angle.

ANGLE (°)	ITERACIONS	Cd	Cl
4	1500	2,85737E-02	-5,69627E-01
5	1500	2,94904E-02	-6,75531E-01
6	1500	3,08777E-02	-7,28467E-01
7	1500	3,27061E-02	-7,55180E-01
7,5	1500	3,37675E-02	<b>-7,61524E-01</b>
8	1500	3,48904E-02	-7,59489E-01
9	1500	3,73315E-02	-7,43632E-01
10	1500	3,99602E-02	-7,12829E-01
11	1500	4,27245E-02	-6,72787E-01
12	1500	4,56000E-02	-6,27998E-01
13	1500	4,75570E-02	-6,77127E-01
14	1500	5,24242E-02	-5,41434E-01
15	1500	6,01218E-02	-5,36881E-01

Taula 11: Dimensionament de longitud.

LONGITUD	ITERACIONS	Cd	Cl
300	1500	3,19180E-02	-4,94971E-01
350	1500	3,22129E-02	-5,70888E-01
400	1500	3,27561E-02	-6,35725E-01
450	1500	3,30704E-02	-6,95301E-01
500	1500	3,36338E-02	-7,48226E-01
550	1500	3,50323E-02	<b>-7,86368E-01</b>
600	1500	3,62124E-02	-8,21346E-01
670	1500	3,68124E-02	-8,57680E-01

Taula 12: Dimensionament de curvatura.

CURVATURA	ITERACIONS	Cd	Cl
P1	1500	3,34430E-02	-8,19631E-01
P2	1500	3,44315E-02	-8,16022E-01
P3	1500	4,26419E-02	-9,08335E-01
P4	1500	3,96053E-02	-9,06779E-01
P5	1500	3,68406E-02	9,83074E-01
P6	1500	3,71834E-02	-1,02289E+00
P7	1500	3,34497E-02	-8,20904E-01
P8	1500	4,43618E-02	-9,03220E-01
P9	1500	4,88360E-02	<b>-1,38355E+00</b>
P10	1500	3,91123E-02	-9,62232E-01
P11	1500	4,08777E-02	-9,23095E-01
P12	1500	4,55112E-02	-7,82884E-01
P13	1500	6,55437E-02	-1,01057E+00
P15	1500	5,38118E-02	-1,16590E+00
P16	1500	3,30575E-02	-8,01453E-01
P17	1500	3,66894E-02	-8,80390E-01
P18	1500	3,43313E-02	-8,35041E-01
P19	1500	4,76800E-02	-1,07854E+00
P20	1500	3,32927E-02	-7,85947E-01
P21	1500	3,86101E-02	-9,06902E-01
P22	1500	4,77046E-02	-1,06857E+00
P23	1500	4,00508E-02	-9,37455E-01
P24	1500	4,19259E-02	-9,19054E-01
P25	1500	4,07310E-02	-9,43948E-01
P26	1500	3,49157E-02	-8,73948E-01

Taula 13: Resultats simulació 3D.

Simulació	Cd	Cl	Ratio Cl/Cd	Àrea Frontal (m <sup>2</sup> )	Downforce (N)	Dragforce (N)	Descripció
1	1,11642	-1,83644	-1,64494	0,51003	-89,63917	54,49400	BEST RW
2	1,07011	-1,80456	-1,68633	0,50983	-88,04933	52,21359	Dues sortides
3	1,12801	-1,87081	-1,65850	0,50978	-91,27119	55,03250	1 Divisor posició central AMB pestanya
4	1,11295	-1,89116	-1,69924	0,50983	-92,27465	54,30352	2 Divisors AMB pestanya
5	1,09903	-1,90779	-1,73589	0,50978	-93,07622	53,61885	1 Divisor posició central SENSE pestanya
6	1,11523	-1,94698	-1,74581	0,50983	<b>-94,99830</b>	54,41494	<b>2 Divisors SENSE pestanya</b>
7	1,10878	-1,85080	-1,66921	0,50978	-90,29633	54,09514	1 Divisor SENSE; 1 Divisor AMB
8	1,11878	-1,88473	-1,68462	0,51150	-92,26060	54,76628	1 Divisors AMB pestanya config. 2
9	1,10659	-1,91854	-1,73374	0,50979	-93,60247	53,98884	2 Divisors SENSE pestanya pos. 2
10	1,07132	-1,83680	-1,71452	0,50978	-89,61298	52,26701	3 Divisors SENSE pestanya
11	1,12994	-1,94851	-1,72443	0,51149	-95,38251	55,31241	FINAL 26 + FINAL 15
12	1,16446	-2,06915	-1,77692	0,51000	-100,99308	56,83600	Paret vertical a roda
13	1,09853	-1,84133	-1,67618	0,51150	-90,13646	53,77493	Amb VG
14	1,16525	-2,03773	-1,74874	0,51228	-99,90406	57,12903	Side wings
16	1,14763	-1,98110	-1,72625	0,51005	-96,70366	56,01943	Amb pared vertical sense difusor
17	1,09626	-1,86040	-1,69704	0,50978	-90,76493	53,48429	Sense Separació
18	1,12653	-1,91692	-1,70162	0,51010	-93,58087	54,99506	Pared vertical + 2 divisors
19	0,58555	0,24823	0,42393	0,42157	10,01502	23,62429	Sense wings, just undertray
20	0,71067	0,16455	0,23154	0,42178	6,64219	28,68668	Sense wings, amb undertray i pared vertical
21	1,07827	-1,88024	-1,74376	0,50989	-91,75237	52,61769	Sense separació màxima extensió
22	1,07857	-1,89077	-1,75304	0,50989	-92,26656	52,63233	Sense separació major angle
23	1,08589	-1,75095	-1,61246	0,51198	-85,79305	53,20643	Angle variable
24	1,13049	-2,35451	-2,08273	0,46632	-105,07778	50,45201	Rodes 10'
26	1,03923	-2,73074	-2,62767	0,44152	-115,38770	43,91259	Sense Rodes, amb wings
27	0,38666	0,13689	0,35405	0,33804	4,42873	12,50890	Sense Rodes, sense wings